

VIHERKATTOJEN KASVUALUSTAN JA KOSTEUDEN VAIKUTUS  
VEDENPIDÄTYSKYKYYN

EVELIINA MATIKKA

HELSINGIN YLIOPISTO  
YMPÄRISTÖTIETEIDEN LAITOS  
PRO GRADU -TUTKIELMA  
15.5.2019



Tiedekunta/Osasto – Fakultet/Sektion – Faculty		Laitos – Institution – Department	
Bio- ja ympäristötieteellinen		Ympäristötieteiden laitos	
Tekijä – Författare – Author			
Eveliina Matikka			
Työn nimi – Arbetets titel – Title			
Viherkattojen kasvualustan ja kosteuden vaikutus vedenpidätyskykyyn			
Oppiaine – Läroämne – Subject			
Ympäristöekologia			
Työn laji – Arbetets art – Level		Aika – Datum – Month, year	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages
Pro gradu		5 / 2019	49
Tiivistelmä – Referat – Abstrac			
<p>Suomen ilmasto-olosuhteissa viherkattojen toiminnasta ja vedenpidätyskyvystä on vielä niukasti tietoa. Tämän Pro gradu -tutkielman tavoitteena on selvittää, millainen viherkattotyyppi olisi optimaalisin hulevesien hallintaan. Tutkimassa selvitetään kokeellisesti sekä kirjallisuuden avulla viherkattojen kasvillisuuden sekä kasvualustan paksuuden ja koostumuksen vaikutuksia kattojen toimintaan.</p> <p>Tutkimuksen kohteeksi otettiin kolme erilaista viherkattovaihtoehtoa. Kaikki on perustettu tiilimurskapohjaiselle kasvualustalle. Kasvillisuutena on joko sammalia, maksaruohoja, kukkakasveja ja heiniä kasvava valmismatto (3 kpl) tai taimi-istutuksin ja kylvämällä perustettu taimikylvökatto (3 kpl). Näiden lisäksi on yksi valmismattokatto, johon on lisätty 1 cm:n kerros biohiiltä. Taimikylvön kasvillisuus koostuu ruohovartisista kukkakasveista ja parista maksaruohosta. Vedenkulkua koeasetelmassa seurattiin kahdella sademittarilla sekä seitsemällä valuntamittarilla, jotka seurasivat sadannan ja valunnan määrää sekä ajoitusta. Lisäksi kolmessa kattoruudussa oli jatkuvatoimiset kosteus- ja lämpötilasensorit eri syvyyksillä: 2 cm, 5cm, 8 cm ja 8 cm etureunassa.</p> <p>Tutkimuksen avulla selvitetään 1) miten kasvualustojen vedenpidätyskyvyt eroavat, 2) mikä käsittely hidastaa valuntaa eniten, 3) miten kasvualustojen lämpötilat eroavat ja 4) mistä erot johtuvat. Biohiilen uskotaan lisäävän veden pidättymistä sateen yhteydessä ja hidastavan veden poistumista sadetapahtumien välillä. Valmismattojen uskotaan pidättävän vettä paremmin kuin taimikylvön, koska runsaampi kasvillisuus pidättää enemmän vettä. Pienimmän valunnan oletetaan vapautuvan hitaimmin. Taimikylvön lämpötilan odotetaan kohoavan korkeimmaksi, koska sen vähäinen kasvillisuus ei varjosta tai haihduta yhtä paljon. Korkean lämpötilan odotetaan nopeuttavan kosteuden poistumista kuivilla kausilla.</p> <p>Keskimääräinen vedenpidätyskyky oli hieman korkeampi taimikylvössä kuin muissa käsittelyissä. Kaikki käsittelyt pidättivät hyvin vettä verrattaessa kirjallisuuteen. Vedenpidätyskyvyn todettiin vähenevän sademäärän kasvaessa. Keskimääräistä suurempien sadetapahtumien (yli 7,3 mm) kohdalla vedenpidätyskyky vaihteli valmismattokatolla 19–97 % välillä, biohiilikatolla 33–98 % välillä ja taimikylvössä 22–99 % välillä. Keskimääräistä pienempien sadetapahtumien kohdalla vedenpidätyskyky puolestaan vaihteli valmismattokatolla 90–99 % välillä, biohiilikatolla 64–99 % välillä ja taimikylvössä 65–100 % välillä. Valuntamäärillä ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja käsittelyjen välillä.</p> <p>Suodosvesi valui nopeimmin taimikylvöstä ja hitaimmin biohiilikatosta. Biohiili siis hidasti valuntaa. Tilastollisia eroja valunnan kestoille ei löytynyt Kruskal-Wallis testillä. Taimikylvön todettiin olevan yleensä kuivin käsittelyistä, mutta se myös vettyi nopeimmin. Taimikylvökaton mitattiin käsittelyjen korkeimmat sekä matalimmat lämpötilat. Lähellä pintaa lämpötila vaihteli huomattavasti. Valmismaton ja biohiilikaton lämpötilat olivat tasaisempia, koska runsaampi kasvillisuus varjostaa ja eristää. Regressioanalyysin perusteella valmismatto- ja biohiilikattojen kosteuspitoisuus vaikutti merkitsevästi niiltä syntyvän valunnan määrään, kun sademäärä oli yli 7,3 mm, mutta ei pienemmillä sateilla. Sateen intensiteetti myös selitti kosteuspitoisuuden muutosta.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
viherkatot, hydrologia, hulevesi, hulevesien hallinta, kaupunkisuunnittelu, kaupungistuminen, biohiili			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

## SISÄLLYS

1.	JOHDANTO .....	4
2.	YLEISTÄ VIHHERKATOISTA .....	6
2.1.	HULEVESIEN HALLINTA VIHHERKATTOJEN AVULLA .....	6
2.2.	VIHERKATTOJEN MUITA HYÖTYJÄ JA HAITTOJA .....	9
2.3.	VIHERKATTOKASVILLISUUS JA SEN VAIKUTUS VEDEN PIDÄTTYMISEEN .....	13
2.4.	SUODOSVEDEN LAATU .....	15
3.	AINEISTO JA MENETELMÄT .....	17
3.1.	KOEASETELMA.....	17
3.2.	TULOSTEN LASKENTA JA TILASTOANALYYSIT.....	21
3.3.	SÄÄOLOSUHTEET KOKEIDEN AIKANA.....	23
4.	TULOKSET.....	25
4.1.	KASVUALUSTOJEN KOSTEUSPITOISUUKSIEN VERTAILU .....	25
4.2.	KASVUALUSTOJEN LÄMPÖTILAT .....	33
4.3.	KASVUALUSTOJEN VEDENPIDÄTYSKY.....	33
4.4.	KÄSITTELYJEN EROT VALUNNAN KOKONAISKESTOSSA .....	38
4.5.	SATEEN INTENSITEETIN VAIKUTUS KATTOJEN KOSTEUSPITOISUUTEEN .....	38
5.	TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	40
6.	VIHERKATTOJEN TULEVAISUUDENNÄKYMÄ .....	44
7.	KIITOKSET .....	47
8.	KIRJALLISUUS.....	48

## 1. JOHDANTO

Pro gradu -tutkielma on suoritettu osana Luonnontieteellisen museon ja Helsingin yliopiston ”Viides ulottuvuus – viherkatot osaksi kaupunkia” -yhteistyöhanketta sekä Kestävän ympäristön kaupunkilaboratorio -hanketta, joka koski vedenkierron hallintaa ja ekosysteemipalveluja kaupunkiympäristössä.

Kaupungistumisen kiihtyminen ja päällystettyjen, vettä imemättömien, pintojen rakentaminen viheralueiden kustannuksella ovat tuoneet mukanaan haasteita hulevesien hallintaan. Yhdeksi ratkaisuksi on ehdotettu viherkattoja, eli kattoja, joissa ohuen maakerroksen päällä on elävää kasvillisuutta. Oikein toimiessaan ne pidättävät sadevesiä itseensä ja vähentävät tulvauhkaa. Ne eivät vie maapinta-alaa tehokkaalta kaupunkirakentamiselta, toisin kuin varsinaiset viheralueet. Viherkattojen yksi merkittävimmistä ekosysteemipalveluista eli elollisen luonnon ihmiselle tuottamista hyödyistä onkin juuri vedenhallinta. Myös kaupunki-ilman laatu paranee kasvillisuuden haihduttaessa, tuottaessa happea ja sitoessa hiiltä.

Ilmastonmuutoksen ja kaupungistumisen vaikutukset vahvistavat toisiaan: kaupunkien lämpösaarekeilmiö, lisääntyvät rankkasateet ja tulvat, ilmansaasteet ja ekosysteemien muutokset ovat ongelmia, joihin vihreä infrastruktuuri yrittää vastata. Viherkatoilla voidaan tutkitusti lieventää ja hallita näitä ongelmia, ja niistä on mahdollista saada myös taloudellista arvoa, etenkin suuressa mittakaavassa käytettynä. Viherkattojen avulla elinympäristöstä voidaan tehdä viihtyisämpi ja esteettisesti miellyttävämpi sekä vaikuttaa positiivisesti asukkaiden terveyteen. Erilaiset keto-, niitty- ja sammalkatot tarjoavat mahdollisuuden luoda elinympäristöjä uhanalaisia lajeja, kuten kasveja, hyönteisiä ja lintuja varten.

Viherkatoista ja niiden kyvystä pidättää vettä on Suomen ilmasto-olosuhteissa vielä hyvin niukasti tietoa, jotta voitaisiin arvioida, onko niitä laajamittaisesti perustamalla mahdollista hallita kaupunkialueiden hulevesiä riittävän tehokkaasti. Kasvualustan kosteudella on huomattava merkitys veden pidättymiseen, mutta toistaiseksi tunnetaan huonosti, miten erityyppiset viherkatoilla käytetyt kasvi- ja kasvualustaratkaisut vaikuttavat kosteusolosuhteisiin eri vuodenaikoina ja vaihtelevissa sääolosuhteissa. Kasvillisuuden tiedetään edesauttavan veden imeytymistä maaperään (Valtanen ym.

2012), ja viherkatoilla sen on todettu myös lisäävän kosteuden poistumista maaperästä, mikä johtuu kasvien haihdutuksesta (Berretta ym., 2014).

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, kuinka viherkattoihin valittu tiilimurskapohjainen kasvualusta ja kaksi erilaista kasvillisuuden perustamistapaa, 1) taimi-istutukset ja siemenkylvö sekä 2) sammalista, maksaruohoista, kukkakasveista ja heinistä koostuva valmismatto, ja erityisesti niiden kosteuspitoisuus, vaikuttavat kattojen kykyyn pidättää sadevettä. Ensin mainittu on kasvillisuudeltaan erittäin niukka kun taas jälkimmäinen muodostaa tiiviin kasvimaton tiilimurskaseoksen päälle. Lisäksi tutkitaan, vaikuttaako biohiili kasvualustan vedenpidätyskykyyn tai kosteuden vaihteluihin sadetapahtumien yhteydessä ja niiden välillä sekä kuinka lämpötila vaikuttaa kosteuden vaihteluun ja haihduntaan.

Kokeelliset tutkimukset tehtiin Lahden Jokimaalla sijaitsevalla tutkimuslaitoksella, jonne koeviherkatot oli perustettu noin vuotta aiemmin. Pro gradu -aineistona käytettiin toukokuusta elokuuhun 2014 kerättyä dataa. Vedenkulkua tutkittiin mittaamalla erikseen sadanta, koekatoilta tuleva valunta ja alustojen kosteuspitoisuus. Sadantaa mitattiin yhdellä kippimittarilla (tipping bucket) sekä Vaisalan sademittarilla. Suodosveden määrää ja valumisnopeutta seurattiin seitsemästä katosta kippimittareilla. Kosteus- ja lämpötilasensoreja oli sijoitettu kolmeen kattoruutuun, kuhunkin neljä sensoria. Sensoreista kolme sijaitsi katon keskivaiheilla 2 cm, 5 cm ja 8 cm syvyydessä ja yksi lähellä koekaton etureunaa 8 cm syvyydessä.

Tutkimusten avulla selvitetään 1) miten kasvualustojen vedenpidätyskyvyt eroavat, 2) mikä käsittely hidastaa valuntaa eniten, 3) miten kasvualustojen lämpötilat eroavat ja 4) mistä erot johtuvat. Biohiilen uskotaan lisäävän veden pidättymistä sateen yhteydessä ja hidastavan veden poistumista sadetapahtumien välillä. Valmismattojen uskotaan pidättävän vettä paremmin kuin taimikylvön, koska runsaampi kasvillisuus pidättää enemmän vettä. Pienimmän valunnan oletetaan vapautuvan hitaimmin. Taimikylvön lämpötilan odotetaan kohoavan korkeimmaksi, koska sen vähäinen kasvillisuus ei varjosta tai haihduta yhtä paljon. Korkean lämpötilan odotetaan nopeuttavan kosteuden poistumista kuivilla kausilla.

## 2. YLEISTÄ VIHHERKATOISTA

Viherkatot jaetaan yleisesti kasvualustan paksuuden mukaan ekstensiivisiin ja intensiivisiin kattoihin. Ekstensiivisen viherkaton kasvualustan paksuus on korkeintaan 15 cm ja intensiivisen katon yli 15 cm (Mentens ym., 2005). Kasvualustalla tarkoitetaan kasvillisuuden pohjaksi tarkoitettua maainesta, josta kasvit ottavat tarvitsemansa ravinteet ja veden. Intensiivisillä viherkatoilla pyritään yleisesti samankaltaisuuteen maanpinnan kasvillisuuden kanssa ja siihen että katolla voi oleskella. Ne vaativat tyypillisesti merkittäviä ajallisia ja taloudellisia investointeja kasvien hoitoon. Ekstensiivisten kattojen kasvillisuusvaihtoehdot rajoittuvat mataliin maanpeittokasveihin, kuten sammaliin, mehikasveihin ja ruohoihin. Ekstensiiviset katot eivät tarvitse niin paljon hoitoa, ja niillä on selvästi funktionaalisempi tarkoitus kuin intensiivisillä katoilla. Ekstensiiviset katot ovat huomattavasti intensiivisiä yleisempiä rakennusten painorajoitusten ja pienempien kulujen vuoksi. Niitä voidaan perustaa katoille, joiden kaltevuus on jopa 45 astetta (Mentens ym., 2005). Intensiivisten viherkattojen kaltevuus on yleensä alle 10 astetta. Viherkatto on niin kutsuttu käännetty katto, jossa vesieriste sijaitsee lämmöneristyksen alla. Tavanomaisiksi katoiksi kutsutaan tässä yhteydessä bitumikattoja (paanu tai kermi), peltikattoja, tiilikattoja ja muita pintamateriaaleja, joiden ei ole tarkoitus imeä vettä. Näissä vesieristys on lämmöneristeen päällä.

### 2.1. HULEVESIEN HALLINTA VIHHERKATTOJEN AVULLA

Yhä suurempi osa maailman väestöstä asuu kaupungeissa, ja Suomessa osuus on jo 85 % (YK, 2018). Kaupungistuminen lisää vettä imemättömiä pintoja viheralueiden kustannuksella. Kaupungeissa hulevesien määrä on tyypillisesti 30 – 50 % sadannasta, mutta rakentamattomalla alueella alle 10 % (Sario ym., 2005). Tämä johtaa hydrologisen kierron häiriintymiseen, kun veden imeytyminen maaperään estyy, pintavalunta kasvaa sekä nopeutuu ja haihdunta vähenee. Kaupunkialueiden sademäärän on yleisesti todettu olevan 10 % korkeampi kuin ympäröivällä maaseudulla (Sario ym., 2005). Se johtuu muun muassa lämpimästä mikroilmastosta ja ilmakehän kosteuden tiivistymisestä saastehiukkasiin. Urbaani valunta lisää tulvia, maan eroosiota ja sedimentaatiota vastaanottavissa vesistöissä. Se sisältää runsaasti saasteita, kuten torjunta-aineita ja polttoainejäämiä (Oberndorfer ym., 2007). Hulevedet johdetaan yleisesti käsittelemättöminä vesistöihin, mikä voi johtaa

luonnonvesien saastumiseen. Kaupunkikeskustoissa hulevesiä johdetaan usein myös sekaviemäriin, jonka tilavuus ei välttämättä riitä rankkasateilla ja viemärit tulvivat.

Ilmastonlämpeneminen lisää sateen intensiteettiä ja määrää, mikä aiheuttaa lisähaasteita hulevesien hallintaan. Suomessakin sademäärän on arvioitu nousevan 15–25 % (Sario ym., 2005). On mallinnettu, että vuotuinen sademäärä Suomessa tulee kasvamaan etenkin talvella (Aaltonen ym., 2008; Jylhä ym., 2009). Sadekuurojen intensiteetin odotetaan kasvavan kesällä ja kokonaissadannan kasvavan hieman (Jylhä ym., 2009). Helsingin vuotuinen sademäärä on tällä hetkellä 650–700 mm (Ilmatieteenlaitos, 27.3.2016), ja sen odotetaan kasvavan vuoteen 2040 mennessä noin 7-8 % 1900-luvun loppuun verrattuna (ilmasto-opas.fi, 27.3.2016).

Viherkattojen tärkein ekosysteemipalvelu on hulevesien määrän vähentäminen ja valunnan hidastaminen. Valunta myöhäistyy, kun kasvualusta pidättää vettä ja veden valumiseen sen läpi kuluu aikaa. Valunnan hidastuminen estää hulevesijärjestelmien tulvimista sekä vähentää mahdollista eroosiota avo-ojissa (Aitkenhead-Peterson ja Volder, 2010). Viherkatot voivat vähentää valuntaa 20–100 % (Ahiablame ym., 2012). Veden pidätyminen riippuu kasvualustan paksuudesta, koostumuksesta, katon kaltevuudesta, kasvilajeista ja kasvualustan kosteudesta sateen alkaessa sekä sadetapahtuman voimakkuudesta ja kestosta. Valunta on yleensä sitä suurempaa mitä ohuempi kasvualusta on ja mitä kaltevampi kattopinta on (Oberndorfer ym., 2007). Viherkattojen etuna hulevesien hallinnassa on, että ne eivät vie maapinta-alaa tehokkaalta kaupunkirakentamiselta.

Viherkattoja pidetään nykyisin yhä useammin käyttökelpoisina ratkaisuin hulevesien paikalliseen hallintaan. Kaupunkien hulevesiratkaisuissa paikallisuus on kasvava trendi, jolla on tunnistettu olevan useita hyötyjä. (Berndtsson ym., 2005) Low impact development (LID) tarkoittaa maankäyttöstrategiaa, jossa hulevesiä hallitaan paikallisesti lähellä niiden syntypaikkaa ja pienessä mittakaavassa (Ahiablame ym., 2012). LID-strategioita on käytetty menestyksekkäästi hulevesien hallintaan, vedenlaadun parantamiseen ja ympäristön suojeluun. LID-ratkaisuissa integroidaan hulevesien hallinta osaksi alueiden suunnittelua aikaisessa vaiheessa ja keskitytään hulevesiongelmien ennaltaehkäisyyn edistämällä luonnonmukaista hydrologista toimintaa. (Ahiablame ym., 2012)

Joidenkin arvioiden mukaan katot muodostavat 21-26 % (Rowe, 2010) tai jopa 32 % (Oberndorfer ym., 2007) urbaanien alueiden pinta-alasta. Viherkatot ovat ihanteellisia kaupunkien hulevesien hallintaan, koska ne hyödyntävät valmista kattopinta-alaa ja vähentävät tontilta poistuvaa valuntaa (Oberndorfer ym., 2007). Osa varastoidusta vedestä haihtuu ilmakehään suoraan kasvualustasta ja osa kasvien haihdutuksen kautta. Kaupunkisuunnittelijat saattavat pitää sadevettä pelkkänä riesana, eikä sitä useinkaan käytetä uudelleen tai kierrätetä (Adler ja Tanner, 2013). Tarvittava vesi tulee kaukaa, ja suhteellisen puhtaatkin hule- tai jätevedet pyritään ohjaamaan mahdollisimman nopeasti puhdistuslaitoksiin ja vapauttamaan alajuoksulle. Perinteiset hulevesijärjestelmät tähtäävät lähinnä valuntahuippujen pienentämiseen, kun taas LID-ratkaisut painottavat hulevesien kokonaistilavuuden vähentämistä (Ahiablame ym., 2012). Tilavuuden pienenemisen uskotaan automaattisesti vähentävän saastekuormaa ja veden virtausnopeuksia (Ahiablame ym., 2012). Viherkatot eivät kuitenkaan auta siinä, että kaupungistuminen vähentää pohjavedeksi päätyvän veden määrää.

Kasvillisuus voi vaikuttaa viherkaton hydrologiseen suorituskyykyyn estämällä sateen pääsyä kasvualustaan asti, ottamalla vettä kasvualustasta ja varastoimalla sitä kasvisolukkoon sekä haihduttamalla (Dunnett ym., 2008). Kasvien varjostus voi myös vähentää kasvualustasta suoraan ilmaan haihtuvan veden määrää. Kasvillisuuden ominaisuudet, kuten latvuston rakenne ja peitteen tiheys, vaikuttavat kasvualustan kosteuteen. Kasvien ja karikkeen vedenpidätyskyky vaikuttavat vesimäärään joka pidätetään, varastoidaan ja palautetaan ilmakehään. (Dunnett ym., 2008)

Viherkatot voivat pidättää keskimäärin 63 % (Dietz, 2007) tai jopa 75 % (Nurmi ym., 2014) sadetapahtuman vesimäärästä. Tämä on erityisen hyödyllistä, kun piha on päällystetty tai vettä läpäisemätöntä savimaata. Haihdunnan vaikutus kumulatiivisen valunnan määrään on merkittävä. Vuotuinen valunta viherkatoilta voi laskea alle puoleen sadannasta, kun viherkatolta haihtuu runsaasti vettä (Berndtsson ym., 2005). Ilmastosta riippuen vedenpidätyskyky voi vaihdella eri vuodenaikoina. Ruotsissa tehdyssä tutkimuksessa ekstensiivinen viherkatto pidatti 46–88 % sateesta kesäkuukausina (huhti-elo) ja muina kuukausina 18–60 %. Koko vuoden keskiarvo oli 49 % (Berndtsson ym., 2005). Veden saatavuus vaikuttaa kasvualustan kyykyyn pidättää vettä. Kun vettä saadaan tasaisesti, haihdunta on paljon nopeampaa kasvikoilla kuin katoilla, joilla on pelkkä kasvialusta, erityisesti kesällä (Oberndorfer ym., 2007). Viherkattojen suorituskyyky yleensä laskee, kun vettä sataa enemmän (Ahiablame ym., 2012). Kun viherkaton vedenpidätyskapasiteetti täyttyy sadetapahtuman



aikana, ylimääräinen vesi valuu pois. Georgiassa ekstensiivisten kattopuutarhojen vedenpidätyskyky oli 90 % sadannan ollessa 12 mm ja laski 39 %:iin sadannan ollessa 50 mm. (Ahiablame ym., 2012)

Kasvualusta saattaa vaikuttaa vedenpidätyskykyyn enemmän kuin kasvillisuus. VanWoert ym. (2005) totesivat, että pelkkä 2,5 cm paksu kasvualusta ilman kasvillisuutta voi pidättää vettä kaksi kertaa niin paljon kuin 2 cm paksu sorakerros. Samanlainen kasvualusta maksaruohokasvillisuudella vähensi valuntaa vain vähän enemmän. (VanWoert ym. 2005) Kasvualustan paksuuden kasvattaminen lisää veden pidättymistä. Mentens ym. (2005) totesivat yli 15 cm kasvialustojen vedenpidätyskyvyn olevan merkitsevästi parempi kuin alle 5 cm paksuisten alustojen. Jyrkemmiltä kasvikoiltoilta voi syntyä enemmän valuntaa kuin loivilta, ja toisaalta katon kaltevuus vaikuttaa myös kasvialustan maksimipaksuuteen. VanWoert ym. (2005) totesivat kasvialustan kaltevuuden vähenemisen ja paksuuden kasvattamisen selvästi vähentävän viherkatolta tulevaa valuntaa.

## 2.2. VIHHERKATTOJEN MUITA HYÖTYJÄ JA HAITTOJA

Viherkatoilla on lukuisia muitakin hyötyjä hulevesien hallinnan lisäksi. Ne voivat esimerkiksi hillitä lämpösaarekeilmiön syntymistä, pienentää kiinteistöjen energiakustannuksia, pidentää katon vesieristeen elinikää ja auttaa melun ja ilmansaasteiden hallinnassa. Lisäksi viherkaton kasvillisuus sitoo hiilidioksidia ja tuottaa happea sekä tarjoaa elinympäristöjä hyönteisille, linnuille ja joillekin kotoperäisille kasveille. Viherkatot parantavat maiseman esteettisyyttä, ja niiden vehreys nostaa kiinteistöjen arvoa ja vähentää stressiä. Intensiiviset kattopuutarhat, joilla kasvaa puuvartisia kasveja, voivat toimia merkittävinä hiilinieluinä kaupunkiympäristössä. (Oberndorfer ym., 2007) Kasvillisuuden tiedetään puhdistavan ilmaa siinä leijuvien partikkelien kiinnittyessä kasvien pinnoille, ja kasvit voivat myös ottaa joitakin saasteita, kuten typenoksideja, sisään. (Oberndorfer ym., 2007)

Haittapuolena on havaittu, että viherkattojen suodosvesi voi olla hyvin ravinnepitoista, mikä voi aiheuttaa hulevesiä vastaanottavien vesistöjen rehevöitymistä. Tähän on tarjottu ratkaisuksi biohiiltä, jonka pitäisi edesauttaa ravinteiden sitoutumista kasvialustaan. Beck ym. (2011) totesivat, että 7 %

biohiiltä sisältäneet koekatot pidättivät keskimäärin 3,3 prosenttiyksikköä enemmän vettä kuin kontrollikatot. Biohiilestä oli erityisesti hyötyä lähellä saturaatiota. Biohiilikattojen valumaveteen pääsi huomattavasti vähemmän kokonaistyppeä, kokonaisfosforia, nitraattia, fosfaattia ja orgaanista hiiltä kuin biohiilettömiltä katoilta. Lisäksi veden sameus väheni biohiilen ansiosta, mikä johtui orgaanisen hiilen määrän vähenemisestä. (Beck ym., 2011) Biohiilen valmistuksessa biomassaan sitoutuu runsaasti hiiltä pyrolyysissä. Biohiilen pitkäikäisyyden vuoksi siitä on povattu pitkäaikaista hiilinielua ilmakehän hiilidioksidille.

Talvella ongelmia voi aiheuttaa toisaalta vähälumisuus, jolloin kasvit ja kasvualusta vuorotellen jäätyvät ja sulavat, tai toisaalta lumenpudotuksen vaikeus. Ehkä viherkattoa ei kuitenkaan asennettaisi katolle, jolta joutuu pudottamaan lunta. Kasvualustan paksuuden lisääminen voi vähentää rankkasateiden ja talvipakkasten kasvillisuudelle aiheuttamia vahinkoja (Ahiablame ym., 2012). Mikäli katto olisi oleskelukäyttöön tarkoitettu, pitää lisäksi valita kasvilajeja, jotka kestävät tallomista.

Kasvillisuuden korvaaminen tummilla lämpöä varastoivilla pinnoilla, kuten asfalttiteillä ja bitumikatoilla, on tärkeimpiä syitä urbaanin lämpösaarekeilmiön syntymiseen. Tällöin kaupunkialue on selkeästi lämpimämpi verrattuna ympäröivään esikaupunkiin tai maaseutuun, etenkin yöaikaan. Ilmaa viilentävän haihdunnan on todettu vähenevän kaupungeissa, joissa on vähemmän kasvillisuutta kuin niiden ympäristössä (Adler ja Tanner, 2013). Lämpösaarekeilmiötä voidaan siis lieventää lisäämällä auringonvalon heijastumista pinnoilta takaisin avaruuteen tai lisäämällä kasvillisuuspeitettä. Kasvillisuus ja kasvualusta heijastavat auringon valoa enemmän kuin tummat päällysteet, ja tarjoavat eristystä (Oberndorfer ym., 2007). Kasvit varjostavat kattopintaa ja haihduttavat vettä, mikä jäähdyttää kattoja ja lisää ilmakehän kosteutta. Kasvien ja kasvualustan haihdutusta varten kasvualustan täytyy kuitenkin olla tarpeeksi kostea (Oberndorfer ym., 2007). Lämpimiä päällystettyjä pintoja pitkin valuva hulevesi voi lämmitä huomattavasti (Adler ja Tanner, 2013). Tämä saattaa myös johtaa vastaanottavien vesien lämpötilan kohoamiseen, mutta hulevesien määrän vähentäminen pienentää lämmittävää vaikutusta.

Joskus kasvien hengissä pitämiseen tarvitaan keinokastelua kuivien jaksojen aikana, jotta katto toimisi optimaalisesti (Rowe, 2010). Se lisää myös viilentävää haihdutusta, ja voi siten olla taloudellinen ratkaisu sisäilman lämpötilan hallintaan. Vuoden 2009 hintatason mukaan laskettiin,

että paikallisen juomaveden käyttäminen rakennuksen viilentämiseen olisi Chicagossa, New Yorkissa, Philadelphiassa ja Seattlessa 41–93 kertaa halvempaa kuin sähköisen ilmastoinnin. Hinta olisi vielä halvempi, jos kasteluun käytettäisiin kierrätettyä hulevettä tai harmaata vettä. (Rowe, 2010) Harmaan veden käyttäminen kasteluun voisi kuitenkin kasvattaa riskiä fosfaattien ja muiden saasteiden vuotamiseen viherkatolta. Kasvien haihdutuksen osuutta ja viilentävää vaikutusta voidaan lisätä valitsemalla kasvilajeja, joiden lehdet ovat suurehkoja ja haihduttavat runsaasti.

Viherkatto vähentää lämpimällä säällä katon läpi sisätiloihin siirtyvän lämpöenergian määrää, jolloin rakennuksen jäähdyttämiseen kuluu vähemmän energiaa (Oberndorfer ym., 2007). Esimerkiksi Singaporessa todettiin lämpöä siirtyvän viherkaton läpi alle 10 % vertailukaton läpi johtuvasta lämpömäärästä sijainnille tyypillisissä sääolosuhteissa. Japanissa lämmön siirtymistä saatiin vähennettyä vuoden aikana 50 % ja Ottawassa jopa 95 %. (Oberndorfer ym., 2007) Viherkatolla voi saada viilentämiseen kuluvan energian osalta säästöjä noin 1,9 €/m<sup>2</sup> yksikerroksiselle asuinrakennukselle ja noin 8,5 €/m<sup>2</sup> viisikerroksiselle toimistorakennukselle vuodessa, mutta täytyy ottaa huomioon, ettei Suomen nykyisessä ilmastossa käytetä kovin paljoa energiaa rakennusten viilentämiseen (Nurmi ym., 2014). Viilennykseen kuluvan energian määrän odotetaan kuitenkin kasvavan ilmastonlämpenemisen myötä. (Nurmi ym., 2014) Talvella viherkatto toimii lämpöeristeenä. Moderniin bitumikattoiseen rakennukseen verrattaessa on arvioitu viherkaton avulla lämpöhäviön pienenemisestä seuraavan säästön olevan noin 3,3 €/m<sup>2</sup> (Nurmi ym., 2014). Ennen vuotta 2005 rakennetussa rakennuksessa voitaisiin saavuttaa jo 22,9 €/m<sup>2</sup> säästö. (Nurmi ym., 2014)

Tavanomaisten tummien kattojen vesieristeet rapistuvat nopeasti ultraviolettisäteilyn vaikutuksesta ja kattolämpötilojen suuren vaihtelun aiheuttamasta laajentumisesta ja supistumisesta. Viherkattojen vesieriste kestää pidempään, koska se on suojassa UV-säteilyltä ja äärimmäisiltä lämpötilanmuutoksilta (Rowe, 2010). Tällöin käyttöikä voi pidentyä yli 20 vuodella (Oberndorfer ym., 2007). Kanadan Ottawassa kasvittoman kontrollikatton lämpötilan todettiin kohoavan kesällä jopa yli 70 °C lämpöiseksi kun viherkaton lämpötila jäi vain 30 °C:een. Kontrollikatton vesieristeen lämpötila kohosi 30 °C:een 342 päivänä 660:sta, kun taas viherkaton vesieriste saavutti 30 °C lämpötilan vain 18 päivänä. (Oberndorfer ym., 2007) Monilajisen ruohojen ja ruohovartisten kukkakasvien sekoituksen on todettu alentavan viherkaton lämpötilaa tehokkaammin kuin yhdestä lajista koostuvan kasvipeitteen (Dunnett ym., 2008). Monilajisuus tarjoaa ehkä enemmän eristäviä ilmataskuja. Talvella katon eristyskyky on parempi yhtenäisen peitteen muodostavalla nurmella kuin kuihtuvilla kukkakasveilla. (Dunnett ym., 2008)

Kasvillisuus ja kasvualusta absorboivat ääniaaltoja enemmän kuin kovat pinnat (Rowe, 2010), ja ne voivat vähentää sisätiloihin kantautuvaa lentomelua. Kasvualustan paksuuden lisääminen vähensi melua 15–20 cm:n paksuuteen asti, mutta sen jälkeen paksuuden lisäämisestä ei todettu olevan lisähyötyä (Rowe, 2010). Viherkaton osuudella kattopinta-alasta ja äänenpaineen heikkenemisellä todettiin suora yhteys, kun melun lähde tai urbaani kanjoni oli toisella puolella rakennusta kuin mittauspiste. Ääniaallot imeytyvät helposti karkean kasvualustan huokosiin ja vaimenevat törmäillessään maapartikkeleihin. Viherkatto voi vähentää äänenvoimakkuutta maksimissaan 10 dB enemmän kuin tavanomainen katto. (Rowe, 2010) Rahalliset säästöt, kun äänieristyksessä luotetaan viherkattoon kattoon asennettavien kipsilevyjen sijaan, ovat 0-20 €/m<sup>2</sup>. (Nurmi ym., 2014) Rankkasateen aiheuttama ropina kovaa kattomateriaalia vasten voidaan myös kokea häiritsevä, etenkin yöllä. Viherkaton kanssa tämä ongelma lieventyy tai poistuu.

Vesi- ja viheralueiden on tunnistettu olevan tärkeitä ihmisten hyvinvoinnille (Berndtsson ym., 2005) Vehreyden tuoma visuaalinen ilo voi tutkitusti auttaa rentoutumisessa ja vähentää stressiä, ja siten parantaa terveyttä (Oberndorfer ym., 2007). Joillakin intensiivisillä viherkatoilla voidaan harjoittaa kaupunkiviljelyä. Kotoperäisiä kasveja pidetään yleisesti ihanteellisina vaihtoehtoina maisemointiin, sillä ne ovat sopeutuneet paikalliseen ilmastoon. Myös biodiversiteettiä ja luonnonsuojelua koskevat käytännöt voivat suosia alueelle tunnusomaista ja edustavaa kasviyhteisöä. Kasvillisuuden avulla voidaan myös lisätä luonnon monimuotoisuutta ja tarjota mettä pölyttäjille ja näin tukea ekosysteemipalvelujen tuottamista. Viherkatot tarjoavat elinympäristöjä ja pesimapaikkoja linnuille ja hyönteisille. Viherkatoilla yleisiä hyönteislajeja ovat esimerkiksi kovakuoriaiset, muurahaiset, luteet, kärpäset, mehiläiset, hämähäkit ja kaskaat (Oberndorfer ym., 2007). Hämähäkkien ja kovakuoriaisten lajimäärät korreloivat positiivisesti kasvilajien monimuotoisuuden ja korkeuserojen kanssa. Kasvillisuuden funktionaaliset ja rakenteelliset ominaisuudet edistävät selkärangattomien monimuotoisuutta enemmän kuin kasvien kotoperäisyys. (Oberndorfer ym., 2007) Ulkomailta tuodut materiaalit saattavat kuitenkin tuoda mukanaan vieraslajeja, todennäköisesti kasveja tai selkärangattomia. Jos ne olisivat helposti leviäviä, voisi niistä aiheutua ekologista ja taloudellista haittaa.

### 2.3. VIHHERKATTOKASVILLISUUS JA SEN VAIKUTUS VEDEN PIDÄTTYMISEEN

Yksinkertaisilla intensiivisillä viherkatoilla kasvaa usein nurmikkoa ja maanpeittokasveja, ja ne saattavat vaatia hoitotoimenpiteitä. (Berndtsson ym., 2008) Ekstensiivisten viherkattojen kasvillisuus koostuu usein mehikasveista, sammalista, ruohokasveista ja yrteistä, ja ne on suunniteltu hoitovapaiksi. Ruotsissa viherkatoilla kasvaa pääasiassa *Sedum album* ja *Sedum acre* -maksaruohoja, koska ne ovat hyviä maanpeittokasveja ja tekevät katon perustamisesta helppoa (Berndtsson ym., 2005). Olosuhteet katolla ovat vaikeat kasvien selviytymiselle ja kasvulle. Liiallisen kosteuden ja äärimmäisen kuivuuden vaihtelu, ääriämpötilat, korkea valon intensiteetti ja alttius tuulelle lisäävät kuivumisriskiä ja voivat vahingoittaa kasveja ja kasvualustaa (Oberndorfer ym., 2007). Sammaleet voivat olla pitkiä aikoja kuivahtaneina kärsimättä siitä. Saadessaan vettä ne pystyvät kuitenkin palautumaan toimintakykyisiksi vain 20 minuutin aikana (Anderson ym., 2010). Ekstensiivisille katoille sopivat vaikeissa olosuhteissa selviävät kasvit. Ne ovat yleensä matalakasvuisia ja muodostavat mattoja tai kasvavat tiheästi. Niillä voi olla ainavihreät lehdet tai varpumainen kasvutapa ja muita kuivuudenkestoa lisääviä ominaisuuksia, kuten mehikasvien lehdet, kyky varastoida vettä tai CAM-yhteyttäminen (crassulacean acid metabolism). (Oberndorfer ym., 2007) CAM-yhteyttävät kasvit pitävät ilmaraot kiinni päivällä haihdunnan estämiseksi ja ottavat tarvitsemansa hiilidioksidin vasta yöllä.

Kasvualusta on oleellinen kasvien kasvulle, mutta se osallistuu myös veden pidättämiseen. (Oberndorfer ym., 2007) Dunnett ym. (2008) totesivat vettä suodattuneen vähiten kasvittoman katon läpi, sillä kesäaikaan sen maa-aines altistui suoraan auringon lämmölle ja tuulelle, mikä edisti haihduntaa. Lisäksi sade tiivistä maanpintaa, jolloin seuraavan sateen yhteydessä maan tulee vettyä, jotta vesi pystyy muokkaamaan pintaa ja pääsee läpi. Paljas kasvualusta pidatti vettä parhaiten, kun siinä oli paljon orgaanista ainetta, mutta toisessa kokeessa se pidättikin vettä huonoiten, kun orgaanista ainetta oli vain vähän. (Dunnett ym., 2008)

Viherkaton perustamisessa täytyy tietenkin ottaa huomioon kattorakenteiden kantavuus, jolloin keveys on etu. Sammalten vedensitomiskyky on suuri, jopa 8-10 kertainen niiden omaan massaansa nähden, kun taas tyypillinen viherkaton kasvualusta sitoo vettä vain 1,3 kertaa massansa verran (Anderson ym., 2010). Sammalkatot pidättivät vettä simuloituissa kokeissa noin kymmenen prosenttiyksikköä enemmän kuin katot, joilla oli pelkkää kasvualustaa tai sammaleen sijaan

putkilokasveja, ja 23 prosenttiyksikköä enemmän luonnollisen sadetapahtuman aikana (Anderson ym., 2010).

Runsaiden sateiden aikana aktiivisten sammalten ja kuivemmalla säällä aktiivisten putkilokasvien yhdistäminen voisi tarjota toisiaan tukevia vedenpidätys- ja haihdutuspalveluja (Anderson ym., 2010). Vuodenaikaisvaihtelut kasvikoostumuksessa pitäisi myös ottaa huomioon arvioitaessa viherkattojen toimintaa (Ahiablame ym., 2012). Vähemmän tehokkaiden kasvien lisääminen kasvualustaan vähentää kuitenkin koko kasvualustan tehokkuutta. Dunnett ym., (2008) totesivat, että lajit, joiden korkeus tai halkaisija olivat suurempia, vähensivät valuntaa enemmän. Versojen kuivapaino ei kuitenkaan korreloinut merkitsevästi valunnan kanssa, josta voidaan arvella kasvin rakenteen vaikuttavan veden vangitsemiseen kokoa enemmän, mutta johtopäätös ei ole varma. Juurien kuivapainon ja viherkaton valunnan välillä sen sijaan todettiin merkitsevä negatiivinen korrelaatio. Todennäköisesti ruohokasvien tiheä juuristo sitoo enemmän vettä kuin harvemmat systeemit (Dunnett ym., 2008). Myös Berretta ym., (2014) totesivat kasvien juuriston pidättävän vettä. Lähelle maanpintaa juurensa kasvattavien putkilokasvien, kuten maksaruohojen, voi olla vaikeaa käyttää syvemmälle kasvualustaan varastoitunutta vettä, jolloin niiden vaikutus vedenpidättymiseen vähenee (Anderson ym., 2010). Sammalet puolestaan pystyvät nopeasti pidättämään huomattavan määrän vettä katon pinnalla, mikä voi nopeuttaa haihduntaa. Sammalet luovuttavat vettä helpommin kuin kehittyneemmät kasvilajit, jotka voivat säädellä itse veden luovutusta. (Anderson ym., 2010)

Kasvualustan paksuus määrää pitkälti soveltuvat kasvilajit ja lajidiiversiteetin. Matalat kasvualustat (2-5 cm) kuivuvat nopeammin ja niiden lämpötila vaihtelee enemmän, mutta ne sopivat yksinkertaisille matalille maksaruoho-sammal-yhteisöille (Oberndorfer ym., 2007). Kasvualustan ollessa 7-15 cm syvä siinä voi kasvaa sekoitus ruohoja, piilotalvehtijoita (geofyytit), vuoristokasveja ja kuivuutta kestäviä ruohovartisia perennoja, mutta siihen tulee myös todennäköisemmin epätoivottuja rikkaruohoja. Sammaleet usein helpottavat putkilokasvien vakiintumista, leviämistä ja selviytymistä muutoin karuissa tai stressaavissa ympäristöissä (Anderson ym., 2010). Ruohojen ja ruohovartisten kasvien on todettu voittavan maksaruohon yli 10 cm paksuisessa jatkuvasti kosteassa alustassa, koska ne varjostavat maksaruohoa. (Oberndorfer ym., 2007)

## 2.4. SUODOSVEDEN LAATU

On esitetty, että viherkatoilta veden mukana valuvat ravinteet voisivat lisätä rehevöitymistä päätyessään vesistöihin. Ratkaisuksi tähän on tarjottu ravinteita sitovaa biohiiltä tai veden käyttämistä kukkien kasteluun tai pienviljelyyn. Veden voi kerätä esimerkiksi tynnyreihin tai jopa johtaa suoraan kasveille, veden määrästä riippuen. Ravinteiden vuotamista ympäristöön voi myös ehkäistä valitsemalla kasvilajeja, jotka eivät kaipa lannoitteita ja pidättäytymällä lannoitteiden käytöstä.

Viherkatot voivat teoriassa adsorboida tai suodattaa saasteita kuiva- ja märkälasseumasta tai kasteluvedestä, mutta ne saattavat myös vapauttaa saasteita suodosveteen kasvualustasta, kasveista tai lannoitteista (Berndtsson ym., 2005). Fysikaalis-kemialliset ympäristömuuttujat, kuten pH, voivat vaikuttaa esimerkiksi raskasmetallien kapasiteettiin sitoutua kasvualustaan ja niiden vapautumiseen kasvukatoilta. Viherkattojen suodosveden laatu riippuu tietenkin kasvualustan koostumuksesta ja paksuudesta, kasvillisuudesta, salaojituksesta, katon iästä sekä sille tehtävistä huoltotoimenpiteistä. Berndtsson ym. (2005) mukaan ekstensiiviset viherkatot eivät kuitenkaan vaikuta vedenlaatuun merkittävästi.

Sateen yhteydessä tapahtuu usein ensihuuhtouma-ilmiö, jossa sateen alussa syntyvässä hulevedessä haitta-ainepitoisuudet ovat korkeimmillaan, ja pitoisuudet laimenevat sateen edetessä (Berndtsson ym., 2005). Haitta-aineita kertyy pinnoille kuivalasseuman kautta ja rakennusmateriaalien hapertumisesta, ja sade huuhtoo partikkeleja, kaasuja ja aerosoleja suoraan ilmasta. Myös viherkattoon pidätyneiden haitta-aineiden tai ravinteiden kohdalla voi tapahtua ensihuuhtoumaa. Kasvualustasta vapautuvat partikkelit voivat pidätyä esimerkiksi tiilimurskan kovalle pinnoille ja huuhtoutua ensivalunnan mukana. (Berndtsson ym., 2005) Sateen voimakkuus ja kiintoaineksen määrä viherkaton valumavedessä korreloivat keskenään. Usein heikko sade huuhtoo ravinteita ja kiintoainesta perinteiseltä katolta, mutta ei viherkatolta, koska siltä ei synny valuntaa. Tämä voi johtaa virheellisiin arviointeihin, kun rankkasateella viherkatolta valuukin suurempia konsentraatioita (Rowe, 2010). Viherkattojen yhdistäminen muihin LID-ratkaisuihin, kuten valunnan ohjaaminen sadevesipuutarhoihin, voi helpottaa vedenlaadun ylläpitoa (Ahiablame ym., 2012). Tavanomaisten vesiliukoisten lannoitteiden käyttöä tulisi välttää niiden huonontaessa valumaveden laatua.

Tutkimuksessa, jossa verrattiin kahta bitumikermikattoa kolmeen viherkattoon, todettiin viherkatoilta vapautuvan suurempia konsentraatioita fosforia, kaliumia, kalsiumia ja magnesiumia kuin kasvittomilta tasakatoilta (Beck ym., 2011). Pennsylvaniassa Yhdysvalloissa viherkattojen valumaveden ravinne- ja ionikonsentraatioiden huomattiin olevan samaa tasoa kuin minkä tahansa istutetun viheralueen maan tasalla. Kuitenkin, vaikka viherkaton valumavedessä oli suurempi konsentraatio saasteita kuin perinteisen katon valumavedessä, saasteiden kokonaismäärä oli pienempi, koska valuntaa tuli viherkatolta vähemmän. (Rowe, 2010)

Kasvualustan ohuus, suuri vedenläpäisykyky sekä matala adsorptiokapasiteetti vaikeuttavat tiiviin kasvipeitteen ylläpitoa (Berndtsson ym., 2005). Ohuita viherkattoja yleisesti lannoitetaan niiden perustamisvaiheessa ja sen jälkeen joka kolmas tai neljäs vuosi. Lannoituksen tarkoituksena on kasvipeitteen tihentäminen ja kukinnan lisääminen (Berndtsson ym., 2005). Clark ym. (2009) totesivat, että orgaanisen aineen lisääminen, kasvillisuuden tiheyden kasvattaminen ja kasvualustan paksuuden lisääminen lisäävät typen sitoutumista kasvualustaan. Istuttamattoman kasvualustan tai sairaiden kasvien on vastaavasti raportoitu aiheuttavan nitraatin vuotamista viherkaton valumaveteen. (Ahiablame ym., 2012) Monterusso ym. (2004) totesivat maksaruohokattojen suodosvedessä korkeamman nitraattikonsentraation kuin ruohovartisia perennoja kasvavan viherkaton valunnassa. Nitraattikonsentraatiot olivat korkeampia myös kasvualustan ollessa ohuempi. Fosforin kohdalla ei löytynyt merkitseviä eroja. (Monterusso ym., 2004)

Etelä-Ruotsissa tutkitut ekstensiiviset maksaruoho-sammalkatot toimivat nitraattityypelle nieluna ja ammoniumtypen konsentraatiota ne vähensivät huomattavasti (Berndtsson ym., 2005). Nitraatin ja ammoniumin konsentraatiot sadevedessä sekä tiilikatolta valuneessa vedessä olivat korkeammat kuin kasvikatolta valuneessa vedessä. Ammoniumtypen konsentraatio sadevedessä oli suurempi kuin nitraatin, joten se saattoi vaikuttaa eroon vapautumisessa. Vastalannoitetulta katolta kuitenkin vapautui ravinteita. Ruotsissa tutkitut viherkatot vapauttivat myös huomattavia määriä kaliumia ja fosforia (Berndtsson ym., 2005). Kaliumin vapautuminen lisääntyi ajan kuluessa siten että reilun kahden vuoden ikäisen katon valuntavedessä todettiin suurin pitoisuus. Suurin osa fosforista oli fosfaattimuodossa, mikä voi indikoida sen olevan peräisin lannoitteista. Uudet tai äskettäin lannoitetut viherkatot vapauttivat enemmän fosfaattia kuin vanhemmat katot.



Tavanomaiselta katolta valuvan veden on osoitettu vievän mukanaan saasteita, jotka ovat peräisin kattomateriaalista tai ilmalaskeumasta (Beck ym., 2011). Tällöin valumavesi ylittää juomavedelle annetut raja-arvot, ja partikkeleihin sitoutuneiden saasteiden epäillään osaltaan johtavan sedimentin toksisuuteen vastaanottavissa vesissä. Metallisten kattomateriaalien on osoitettu olevan kadmiumin ja sinkin lähde, ja bitumipaanukatosta voi vapautua lyijyä. (Beck ym., 2011)

Berndtsson ym., (2005) totesivat joidenkin metallien konsentraatioiden suodosvedessä vastaavan kohtalaisesti saastunutta luonnonvettä, mutta konsentraatiot olivat alhaisemmat kuin kaupunkihulevedessä. Valuntaveden laatu metallien suhteen todettiin yleisesti ottaen hyväksi. Simuloidun kokeen mukaan viherkatot pidättivät suuren osuuden sinkistä ja kuparista, kun niille johdettu vesi sisälsi suuremmat konsentraatiot metalleja kuin sadevesi. Saksassa tehdyn tutkimuksen mukaan viherkattojen kyky sitoa raskasmetalleja riippui pääasiassa niiden vedenpidätyskyvystä. (Berndtsson ym., 2005)

### 3. AINEISTO JA MENETELMÄT

#### 3.1. KOEASETELMA

Lahden Jokimaan tutkimusasemalle kesä-heinäkuussa 2013 rakennetun koeasetelman alkuperäinen tarkoitus oli tutkia biohiilen vaikutusta vedenlaadun ja veden määrän hallintaan viherkatoilla. Viherkatot on rakennettu tähän tarkoitukseen sopiviksi. Tämän tutkielman aineisto on kerätty 1.5. – 30.8.2014 välisenä aikana. Käsittelyjä on perustettu neljää erilaista: valmismatto biohiilellä ja ilman sekä taimikatto biohiilellä ja ilman. Kutakin käsittelyä on viisi kappaletta, jonka lisäksi on rakennettu viisi kontrollikattoa (kuva 1). Kaikkien koekattojen osalta valuntaa seurattiin keräämällä suodosvettä 25 litran kanistereihin. Tässä tutkielmassa tarkastellaan kuitenkin vain koekattoja, joiden alle on sijoitettu valuntaa mittaavat kippimittarit. Näitä kattoja on 7 kappaletta, joista 3 kappaletta oli taimikattoja ilman biohiiltä (taimikylvö), 3 valmismattokattoja ilman biohiiltä (valmismatto) ja yksi valmismattokatto biohiililisäyksellä (biohiilikatto).

Kasvualustojen kosteutta ja lämpötilaa seurattiin kolmessa koekatossa: yksi taimikylvö, yksi valmismattokatto ja yksi biohiilikatto. Antureita sijoitettiin kuhunkin koekattoruutuun neljä kappaletta, joista kolme sijaitsee katon keskivaiheilla kahden, viiden ja kahdeksan senttimetrin syvyydessä ja yksi katon etureunan läheisyydessä kahdeksan senttimetrin syvyydessä. Asettelussa on mukailtu aiemmin Sheffieldin yliopistossa tehtyä tutkimusta (Berretta ym., 2014).

Sään seurantaan käytössä oli Vaisalan WXT520 Micro Weather Station -sääasema, joka mittaa jatkuvasti sadantaa, ilman lämpötilaa, ilman suhteellista kosteutta, ilmanpainetta sekä tuulen suuntaa ja nopeutta. Mittausten resoluutio oli 10–20 minuuttia seurantajakson aikana. Sadantaa seurattiin myös yhden parin metrin korkeudelle asennetun kippimittarin avulla. Sadetapahtumat laskettiin erillisiksi, kun edeltävän sadetapahtuman aiheuttaman valunnan päättymisen ja seuraavan sateen alkamisen väliin jää vähintään 6 tuntia. Analyyseissä käytettiin touko-heinäkuulle kippimittarin ja Vaisalan sääaseman valuntojen keskiarvoa, ja elokuulle pelkästään kippimittarin mittaamaa valuntaa. Vaisalan sadanta oli lähempänä Ilmatieteen laitoksen mittauksia, mutta heinäkuussa sen mittauksessa tai ajastuksessa oli vikaa.

Yhden viherkattoruudun pinta-ala on 2 m<sup>2</sup> (1 m x 2 m), ja sen kaltevuus on 4 astetta. Koekattojen kasvualustana on tiilimurskaseos, josta 85 % on murskattua tiiltä, 5 % kompostia, 5 % kuorikehaketta ja 5 % turvetta. Tiilimurska on rakennusjätettä, ja komposti ja kuorikehake sivutuotteita. Taimikylvössä kasvualustan paksuus oli 10 cm. Valmismattojen alla on 6 cm paksu kerros tiilimurskaseosta. Kasvualustoihin lisätty biohiili on Charcoal Finland Oy:n koivupuusta pyrolyysillä valmistama tuote. Hiilimurska syntyy ilman happea tapahtuvassa palamisessa suhteellisen alhaisessa lämpötilassa (450 °C). Biohiilen pitäisi sitoa itseensä ravinteita ja vettä. Koekattojen biohiilikerros on 1 cm paksu, ja se sijaitsee 5 senttimetrin syvyydessä. Lokakuussa 2014 tehdyissä kokeissa orgaanisen aineen määrä taimikylvökatoissa oli 18,4 m-%, valmismattokatoissa 18,7 m-% ja biohiiltä sisältävissä valmismattokatoissa 24,5 m-%. Vedenpidätyskyky laboratoriokokeissa oli taimikylvössä 122 m-%, valmismattokatoissa 133 m-% ja biohiilikatoissa 180 m-%.

Taimikylvökattoihin istutettiin kuhunkin kuusi astiataimea. Käytetyt kasvilajit olivat *Campanula rotundifolia* (kissankello), *Centaurea jacea* (ahdekaunokki), *Fragaria vesca* (ahomansikka), *Knautia arvensis* (ruusuruoho), *Lotus corniculatus* (keltamaite), *Pilosella officinarum* (huopakeltano), *Veronica spicata* (tähkätädyke) ja *Viola canis* (aho-orvokki). Lisäksi kattoihin kylvettiin siemeniä.

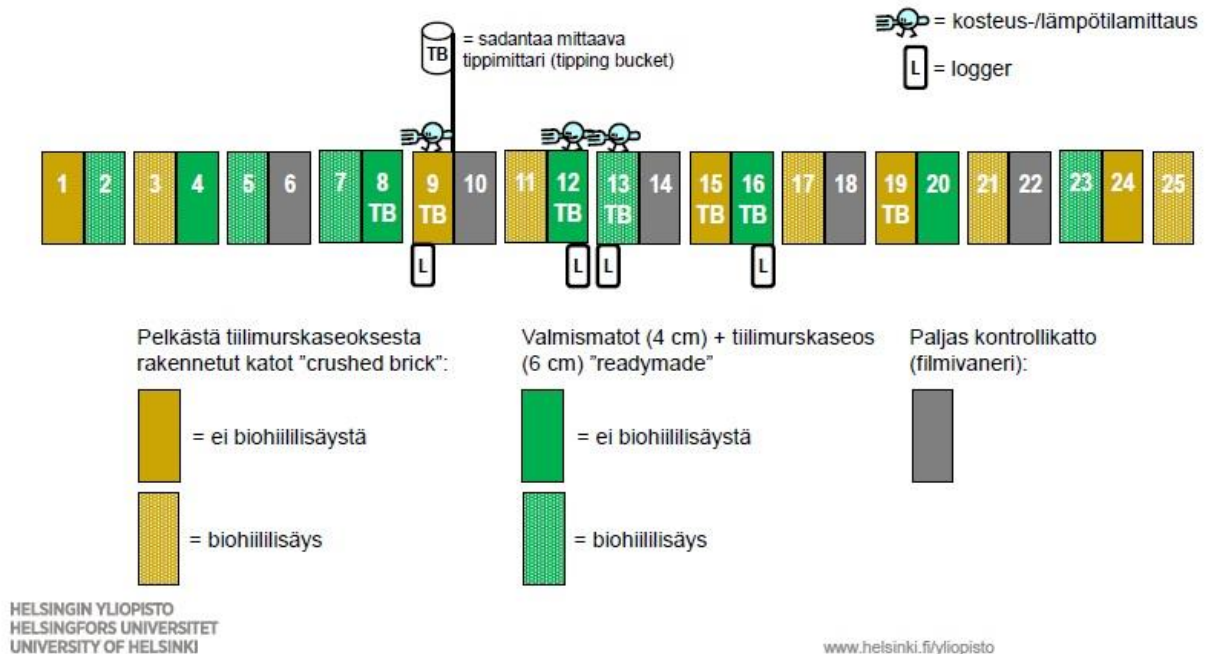
Siemenkylvössä käytetyt lajit olivat *Antennaria dioica* (kissänkäpälä), *Allium Schoenoprasum* (ruoholaukka), *Dianthus deltoides* (ketoneilikka), *Galium verum* (keltamatar), *Leucanthemum vulgare* (päivänkakkara), *Sedum acre* (keltamaksaruoho), *Sedum telephium* (isomaksaruoho), *Thymus serpyllum* (kangasajuruoho) ja *Viola tricolor* (keto-orvokki).

Ruotsalaisen VegTechin valmistamat valmismatot ovat noin 4 cm paksuja, ja ne koostuvat sammalista, maksaruohoista, yrtti- ja ruohokasveista. Käytettyjä lajeja ovat esimerkiksi *Festuca ovina* (lampaannata), *Poa alpina* (tunturinurmikka), *Corynephorus canescens* (hopeaheinä), *Poa compressa* (litteänurmikka), *Sedum album* (valkomaksaruoho), *Sedum acre* (keltamaksaruoho), *Sedum sexangulare* (särmämaksaruoho), *Sedum spurium* (kaukasianmaksaruoho), *Sedum ewersii* (turkestaninmaksaruoho), *Leucanthemum vulgare* (päivänkakkara), *Dianthus arenarius* (hietaneilikka), *Dianthus deltoides* (ketoneilikka), *Campanula rotundifolia* (kissankello), *Galium verum* (keltamatar), *Achillea millefolium* (siankärsämö), *Veronica spicata* (tähkätädyke), *Saxifraga granulata* (papelorikko), *Centaurea jacea* (ahdekaunokki), *Echium vulgare* (kyläneidonkieli), *Thymus serpyllum* (kangasajuruoho), *Pilosella officinarum* (huopakeltano), ja *Trifolium repens* (valkoapila). Maton alustana on kuitukangas ja nylonverkko. Kuitukankaan rei'itys edesauttaa ilman läpipääsyä.

Kesällä 2014 tehdyssä kasvillisuuskartoituksessa laskettiin taimikylvökatoilla olevan sammalia keskimäärin alle 0,5 % ja putkilokasveja noin 10 % pinta-alasta. Valmismattokatoilla todettiin olevan myös noin 10 % alalla putkilokasveja, ja sammalia oli keskimäärin 61 % pinta-alasta biohiiltä sisältävillä katoilla ja 49 % katoilla, joissa ei ollut biohiiltä.

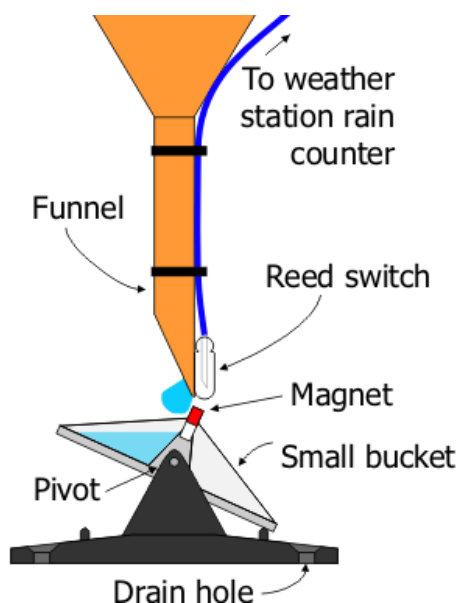
Kontrollikatot ovat paljasta filmivaneria. Kasvikatoissa filmivanerin ja kasvualustan välissä on kolme kerrosta, jotka suojaavat vaneria ja ohjaavat valuntaveden sille rakennettuun kouruun. Alimpana on kaksoisrakenteinen RANKKA-aluskate, jonka yläpinta on tiivistä HD-polyeteeniverkkoa ja alapinta kuitukangasta, jonka luvataan estävän katteen alapintaan tiivistyvän kosteuden valumisen alempiin rakenteisiin. Keskimmäisenä on Hollantilaisen Nophadrainin 17 mm paksu salaojalevy (ND 4+1h Drainage System), jossa keskellä on rei'itetty polystyreenilevy (HIPS = high impact polystyrene) ja molemmin puolin erilaiset suodatinkankaat. Salaojalevy estää hydrostaattisen paineen kertymistä, suojelee kattorakenteita mekaaniselta paineelta sekä edesauttaa veden haihtumista eristeistä. Salaojalevy voi valmistajan mukaan varastoida n. 4,3 litraa vettä neliometriä kohden, mutta

kapasiteetti oletettavasti vähenee kaltevilla koekatoilla. Päälimmäisenä on VegTechin 10 mm paksu lumpukkankaasta tehty matto, jonka tarkoituksena on sekä sitoa vettä itseensä että kuljettaa sitä pois alusrakenteista.



**Kuva 1.** Koeasetelma. Valuntaa seurattiin kippimittareilla katoista 8, 9, 12, 13, 15, 16 ja 19. Kosteus- ja lämpötila-anturit sijaitsivat katoissa 9, 12 ja 13. (Kirsi Kuoppamäki, 2014)

Viherkattojen suodosvesi laskee kattoruutujen etureunassa olevien kolmen aukon kautta kouruihin, joista vesi valuu kippimittarien (tipping bucket) suppiloihin. Suppilon alla on keinulaudan lailla tarkkaan tasapainotetut kaksi pientä vesisäiliötä. Yläasennossa oleva säiliö pysyy paikallaan magneetin avulla, kunnes se täyttyy kalibroidulla tilavuudella (0,2 mm). Säiliön täyttyessä magneetin vetovoima ei enää riitä kannattelemaan sitä, jolloin täysi säiliö laskeutuu ala-asentoon, ja tyhjä säiliö kiinnittyy yläasennossa magneettiin. Ala-asennossa oleva säiliö tyhjenee, ja vesi valuu ulos laitteesta. Mittarin sensori havaitsee ja laskee säiliöiden keinahdukset, joiden avulla tietokone laskee mittarin läpi kulkeneen veden määrän. Kippimittarin tuloksiin voi syntyä epätarkkuutta, jos sateen tai valunnan loppuessa mittarin yläasennossa oleva säiliö ei ehdi täyttyä. Tällöin säiliöön jäänyt vesi lisää valuntatilavuutta seuraavan sateen kohdalla. Tässä tutkimuksessa on kuitenkin tärkeämpää vertailla eri käsittelyjen valuntamääriä kuin saada absoluuttisia sade- ja valuntamääriä.



**Kuva 2.** Kippimittarien toimintaperiaate. (Lähde Kirjallisuus-osiossa)

### 3.2. TULOSTEN LASKENTA JA TILASTOANALYYSIT

Eri käsittelyjen keskimääräiset volumetriset eli tilavuuteen suhteutetut kosteuspitoisuudet ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) ja lämpötilat ( $^{\circ}\text{C}$ ) sekä niiden maksimi- ja minimiarvot laskettiin Excelin avulla kullekin kasvualustan mittauspisteelle erikseen. Arvojen avulla selvitettiin, eroavatko kosteuspitoisuudet tai lämpötilat eri kerroksissa ja onko niillä vertikaaligradienttia. Koekattojen välisiä eroja selvitettiin lisäksi keskimääräisten kosteuspitoisuuksien avulla.

Kosteuspitoisuuksista laskettiin, kuinka paljon ne muuttuvat sadetapahtumien aikana ja niiden välillä suhteessa kasvualustan kosteuteen kyseisen kauden alkaessa. Sadetapahtumien kosteuden muutos laskettiin tuntia kohden, jotta eri sadetapahtumien arvot olisivat keskenään vertailukelpoisia. Sadejaksojen kesto oli keskimäärin 21,1 h ja keston mediaani 10,5 h, joten kosteudenmuutosta ei kannattanut laskea vuorokautta kohden. Kuivien kausien kosteuden muutos laskettiin vuorokautta

kohden, koska niiden kesto oli keskimäärin 50,4 h ja mediaani 35,3 h. Sadejaksot ja kuivat kaudet luokiteltiin lämpötilan mukaan kylmiin, leutoihin ja kuumiin jaksoihin. Kylmien jaksojen keskilämpötila oli alle 9 °C, leutojen 9-19,99 °C ja kuuman yli 20 °C. Eri lämpötiloja edustavia sadetapahtumia ja kuivia kausia valittiin kosteuskuvia varten, siten että jaksot olivat mahdollisimman pitkiä.

Berretta ym. (2014) valitsivat 5 kuivaa kautta, joiden pituus oli vähintään 10 vrk, lähempään tarkasteluun, ja jakoivat ne viileämpiin ja lämpimiin kausiin. Aineistossani oli kuitenkin vain yksi kuiva kausi, joka oli yli 10 vrk pitkä, joten päätin tarkastella kuivia kausia lämpötilan mukaan. On tärkeää nähdä, miten viherkattojen kosteuspitoisuus muuttuu yleisimmissä sääoloissa, eikä tarkastella pelkästään pitkiä kuivia kausia. Viherkattojen täytyy pystyä haihduttamaan tarpeeksi lyhyilläkin kuivilla kausilla, jotta ne ovat valmiina pidättämään mahdollisimman paljon seuraavasta sateesta. Toisaalta liian nopea haihdutus voi johtaa kasvillisuuden liialliseen kuivumiseen.

Alustojen valunnan määrän riippuvuutta alustojen kosteuspitoisuudesta sadetapahtuman alussa tarkasteltiin SPSS-ohjelmiston regressioanalyysillä. Sadetapahtumat jaoteltiin analyysijä varten keskimääräistä suurempiin ja keskimääräistä pienempiin sadetapahtumiin, ja keskimääräinen sadanta oli 7,3 mm. Eri käsittelyjen valuntamäärät jaettiin myös keskimääräistä pienempien ja suurempien sateiden mukaan, ja testattiin käsittelyjen eroja Kruskal-Wallis testillä. Sateen intensiteetin vaikutusta koekattojen kosteuspitoisuuden muutokseen tutkittiin myös SPSS-ohjelmiston regressioanalyysillä. Analyysiä varten sadetapahtumat jaettiin niiden keskimääräisen lämpötilan mukaan yli 15 °C ja alle yli 15 °C jaksoihin.

Joka kuukauden suurimmasta sateesta (maksimisade) piirrettiin Excelissä sadanta- ja valuntakuvaajat tarkempaan tarkasteluun. Lisäksi suurimmille sadetapahtumille laskettiin valuntaviive ja kuinka paljon vettä ehti sataa ennen kuin valunta katoista alkoi. Koekattojen kosteuspitoisuuksia sateen alkaessa vertailtiin valuntaviiveen ja valunnan määrän erojen selittämiseksi. Maksimisateiden valuntaviive laskettiin siten, että valunta katsottiin alkaneeksi, kun valunnan summa oli 1 mm. Laskutapa johtui siitä, että valuntadatan suhteuttaminen koekaton kokoon antoi arvoja, jotka olivat kippimittarin resoluution alapuolella. Lisäksi kippimittari ei ollut täysin suojattu sateelta. Sadetapahtumien valinnassa ei huomioitu sademäärän lisäksi niiden kestoa tai ilman lämpötilaa.

Jokaisen sadetapahtuman kohdalla koekattojen valunnan kestosta vähennettiin sateen kesto, jotta voitaisiin nähdä, hidastavatko käsittelyt valuntaa eri tavoin. Koska sademäärä vaikuttaa valunnan

keston, aineisto jaettiin tutkimusajanjakson keskimääräisen sadannan (7,3 mm) mukaan keskiarvoa suurempiin ja pienempiin sateisiin. Aineisto ei ollut normaalisti jakautunut, joten käsittelyjen eroja verrattiin SPSS-ohjelmistossa ei-parametrisellä Kruskal-Wallis testillä.

### 3.3. SÄÄOLOSUHTEET KOKEIDEN AIKANA

Sademittarien sadantaa verrattiin Ilmatieteen laitoksen pitkän aikavälin (1981–2010) ilmastodataan luotettavuuden arvioimiseksi. Ilmatieteen laitoksen Lahden säähavaintoasema sijaitsi vuonna 2014 Launeella noin 4 km Jokimaan tutkimusasemalta koilliseen. Alue on pientalovaltaista ja maasto alavaa, mistä johtuen aurinko lämmittää päivisin enemmän ja yöllä on usein kylmempää kuin kaupungin keskustassa. Jokimaan tutkimusasema on niittyjen ympäröimä ja olosuhteet ovat oletettavasti hyvin samankaltaiset kuin säähavaintoaseman ympäristössä. Sekä säähavaintoaseman että Jokimaan tutkimusaseman itäpuolella on korkeaa metsää, joka suojaa itätuulelta.

Kesän 2014 sääolosuhteet Lahdessa olivat hyvin tyypilliset (Taulukko 1.). Tutkimusajanjakson keskilämpötila oli 14,5 °C, ja sen poikkeama vuosien 1981–2010 keskiarvosta oli +0,4 °C. Ajanjakson sademäärä oli 285,7 mm, joka on 8 % korkeampi kuin pitkän aikavälin keskiarvo. Toukokuun keskilämpötila ylitti juuri termisen kesän rajan (vuorokauden keskilämpötila >10°C), mutta alkukuussa oli vielä kylmempiä päiviä. Touko- ja kesäkuu 2014 olivat Ilmatieteen laitoksen mukaan huomattavasti keskimääräistä sateisempia ja elokuun sadanta hyvin lähellä keskiarvoa. Heinäkuun keskilämpötila oli pari astetta keskiarvoa korkeampi ja sadanta puolestaan vain vajaan kolmasosan keskimääräisestä. Jokimaan viherkattotutkimuksessa käytettyjen sademittarien mittaama sadanta oli touko- ja kesäkuussa hyvin lähellä Ilmatieteen laitoksen arvoja, ja elokuussakin eroa oli vain noin 10 mm. Sen vuoksi on perusteltua pitää sademittarien tarkkuutta ja toimintaa luotettavana. Heinäkuussa Jokimaan sademittarit antoivat kuitenkin noin 22 mm korkeamman arvon sadannalle. Se voi kuitenkin johtua paikallisista sadekuuroista. Koko kesän sadanta oli Jokimaan sademittarien mukaan 4 % korkeampi kuin Ilmatieteen laitoksen mukaan.

**Taulukko 1.** Tutkimusajanjakson keskimääräinen ilman lämpötila ja sadanta Lahdessa vuosina 1981-2010 sekä 2014 (Ilmatieteen laitos, 2019) ja Jokimaan koeasetelmaan kuuluvien sademittarien sadanta vuonna 2014.

Kuukausi	Keskilämpötila (°C) Lahti 1981-2010	Keski- lämpötila (°C) 2014	Keski- määräinen sadanta (mm)	Sadanta (mm) 2014	Jokimaa sademittarit 2014
Toukokuu	9,9	10,1	43,1	80,3	79,0
Kesäkuu	14,3	12,6	65,7	103,3	105,5
Heinäkuu	17,1	19,2	79,2	24,6	46,9
Elokuu	15	16,1	77,2	77,5	67
Keskiarvo	14,1	14,5	Yhteensä	265,2	285,7
				298,3	

Kuivat kaudet olivat kesällä 2014 huomattavasti pidempiä kuin sadejaksot, mutta lämpötiloissa ei ollut suurta eroa (Taulukko 2). Kuivien kausien keskimääräinen lämpötila oli yhden asteen korkeampi kuin sadejaksojen. Sadetapahtumia oli toukokuussa 11 kpl, kesäkuussa 12 kpl, heinäkuussa 9 kpl ja elokuussa 9 kpl – yhteensä 41 kpl.

**Taulukko 2.** Jokimaan sademittarin ja sääaseman avulla määritettyjen sadejaksojen ja kuivien kausien keston ja lämpötilan keskiarvot, minimi, maksimit ja mediaanit touko-elokuussa 2014.

2014	Sadejaksot		Kuivat kaudet	
	Kesto (h)	Lämpötila (°C)	Kesto (h)	Lämpötila (°C)
keskiarvo	21,1	14,2	50,4	15,2
minimi	1,0	3,0	8,0	3,0
maksimi	85,3	24,8	254,7	24,1
mediaani	10,5	14,6	35,3	16,2



## 4. TULOKSET

### 4.1. KASVUALUSTOJEN KOSTEUSPITOISUUKSIEN VERTAILU

Valmismattokatto oli yleisesti kuivin lähellä kasvualustan pintaa 2 cm:n syvyydessä (Kuva 3), ja kostein 5 cm:n syvyydessä, paitsi toukokuussa alustan etureunassa 8 cm:n syvyydessä. Päinvastoin kuin valmismattokatossa, biohiilikaton keskimääräinen kosteuspitoisuus oli joka kuukausi alin 5 cm:n syvyydessä. Suurimmat kosteuspitoisuudet puolestaan mitattiin alustan etureunasta 8 cm:n syvyydestä. Taimikylvössä sekä kosteuden maksimi- että minimiarvot mitattiin kasvualustan pinnan läheltä. Taimikylvön keskimääräinen kosteuspitoisuus oli korkein 5 cm:n syvyydessä, ja yleensä alin alustan etureunassa 8 cm:n syvyydessä, mutta erot olivat hyvin pieniä.

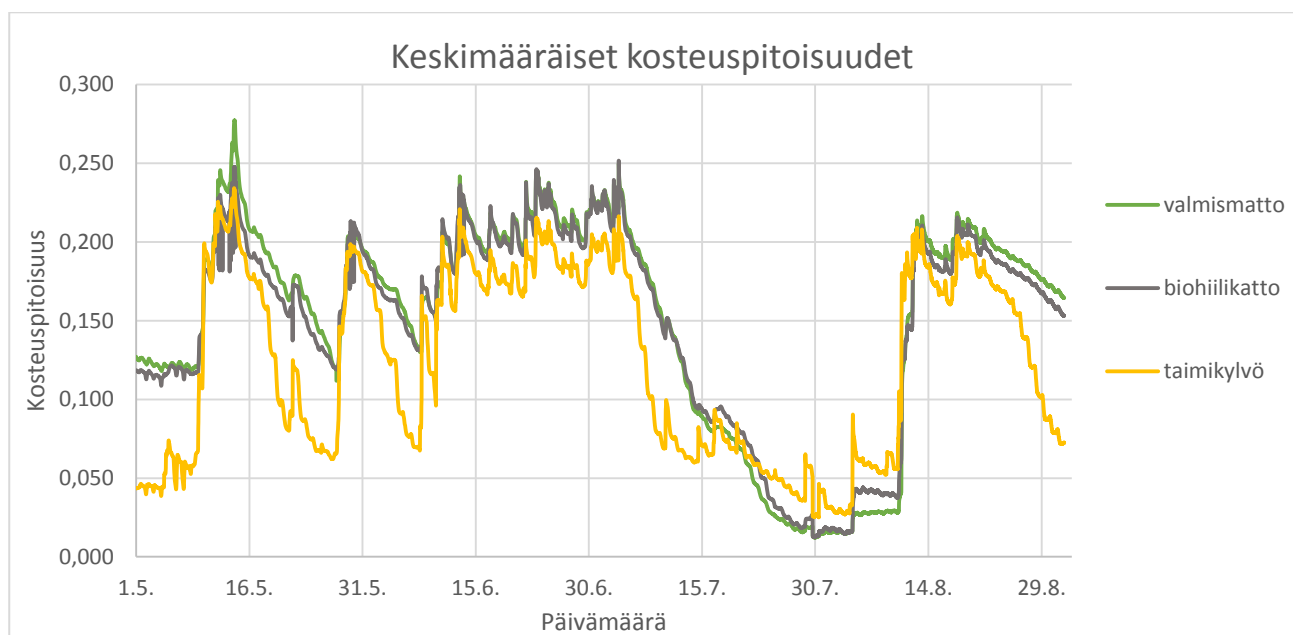
Toukokuun alkupuolella sateen alkaessa huomataan kosteuspitoisuuden nousevan taimikylvössä erittäin jyrkästi – pinnalla kosteuspitoisuus nousi noin viisinkertaiseksi muutamassa vuorokaudessa (Kuva 3). Valmismatto- ja biohiilikatto olivat kuitenkin samaan aikaan kosteampia. Silti niissäkin kosteus kaksinkertaistui. Kesäkuussa taimikylvön kosteuspitoisuus lähellä pintaa kasvoi myös paljon enemmän kuin toisissa katoissa, mutta kosteuspitoisuus pohjalla ei noussut paljoa. Heinäkuussa kosteuspitoisuus laski kaikissa käsittelyissä tasaisesti, ja katoista tuli hyvin kuivia kaikissa kerroksissa. Taimikylvössä pinta kuivui kaikkein eniten, mutta siinä havaittiin myös suurimmat kosteusvaihtelut sateiden aikana. Elokuussa kattojen kosteuspitoisuus nousi hyvin jyrkästi kaikissa käsittelyissä, koska ne olivat niin kuivia sateen alkaessa.

Kosteuskuvaajista nähdään hyvin, kuinka alustan keskimääräisen lämpötilan kohoaminen laskee kosteuspitoisuutta – ja kosteuden lisääntyessä lämpötila laskee. Taimikaton kosteudessa ei ole havaittavissa samanlaista kerrostuneisuutta kuin valmismatto- ja biohiilikatoilla. Valmismatto- ja biohiilikattojen kosteuskäyrät ovat keskenään hyvin samanmuotoiset. Biohiilikaton pohjalta etureunasta mitattu kosteuspitoisuus erottuu kuitenkin joka kuukausi selvästi korkeampana kuin muissa kerroksissa. Kosteuspitoisuudet nousivat ja laskivat eri kerroksissa hyvin samanaikaisesti ja yhteneväisesti toisiinsa nähden, joten on perusteltua käyttää koko kasvualustan kosteuspitoisuuden keskiarvoa myöhemmissä analyyseissä. Berretta ym. (2014) totesivat, että keskiarvoa voidaan käyttää ohuen viherkaton toiminnan analysoinnissa kosteuden vertikaaligradientista huolimatta. Ainoastaan taimikylvön pinnassa kosteuspitoisuus vaihtelee välillä aivan eri tahdissa kuin syvemmillä katossa. Alustan keskimääräinen kosteus on kuitenkin vedenpidätyskyvyn kannalta tärkeämpää kuin pintakosteuden heilahtelut.



**Kuva 3.** Kasvualustojen kosteuspitoisuudet ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) eri syvyyksissä sekä alustojen keskimääräiset lämpötilat ( $^{\circ}\text{C}$ ) touko-elokuussa 2014. Huomaa eri asteikko taimikylvön kosteuspitoisuudessa.

Taimikylvö on yleisesti kuivin käsittelyistä (kuva 4). Sen kosteuspitoisuus nousee kuitenkin sateen aikana hyvin nopeasti samalle tasolle kuin valmismatto- ja biohiilikatoissa. Taimikylvön kosteuspitoisuus myös laskee kuivien kausien aikana nopeammin kuin muissa käsittelyissä. Kaikista käsittelyistä suurimmat kosteuspitoisuudet mitattiin biohiilikatosta. Toukokuussa valmismattokaton suurin kosteuspitoisuus oli samaa suuruusluokkaa kuin biohiilikatossa, mutta kesäkuusta eteenpäin se laski noin 6 prosenttiyksikköä alemmaksi kuin biohiilikatossa. Taimikylvön maksimikosteuspitoisuudet ovat lähes yhtä suuret kuukaudesta toiseen ja 8-13 prosenttiyksikköä matalampia kuin biohiilikaton korkeimmat kosteuspitoisuudet.



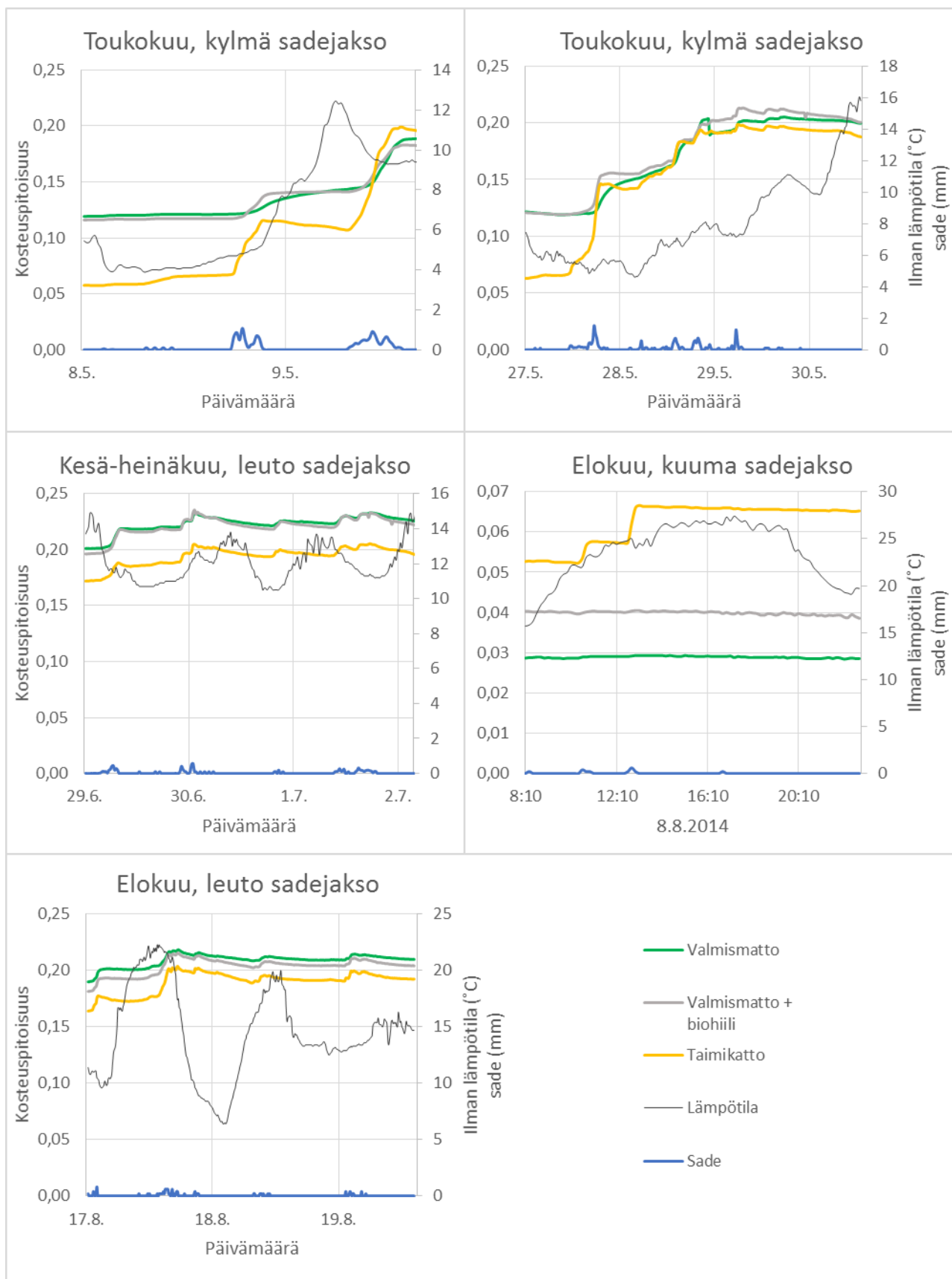
**Kuva 4.** Kasvualustojen keskimääräiset kosteuspitoisuudet (m³/m³) touko-elokuussa 2014.

Alkukosteuteen suhteutettu kosteuden lisääntyminen sadejaksojen aikana oli keskimäärin suurinta taimikylvössä (Taulukko 3). Taimikylvön suurin kosteuspitoisuuden kasvu (102 % tunnissa) oli kuusinkertainen biohiilikaton ja seitsenkertainen valmismaton arvoihin nähden. Kosteuspitoisuudet vähenivät muutamien sadejaksojen aikana sateen ollessa hyvin heikkoa. Tutkimusajanjaksolla sadetapahtumista oli kylmiä 9, leutoja 24 ja kuumia 8 kappaletta. Ilman lämpötila ei välttämättä vaikuta viherkattojen kosteuspitoisuuteen sadetapahtuman aikana. Valmismatto- ja biohiilikattojen kosteuspitoisuudet olivat sadetapahtumien aikana hyvin lähellä toisiaan ja lisääntyivät tasaisesti (Kuva 5). Taimikylvön kosteuspitoisuus erosi selkeästi muista käsittelyistä ja kasvoi toukokuun kylmillä sadejaksoilla ja elokuun kuumalla sadejaksolla selvästi nopeammin. Leudoilla sadejaksoilla

viherkaton perustamistavalla ei ollut yhtä selkeää vaikutusta kosteuden muutoksiin, mutta taimikylvö oli käsittelyistä kuivin.

**Taulukko 3.** Koekattojen kosteuspitoisuuden muutos per tunti sadejaksojen aikana kesällä 2014.

Sadejaksot	Kosteuden muutos (%) per tunti		
	Valmismatto	Valmismatto + biohiili	Taimikatto
keskiarvo	1,22	1,60	7,64
mediaani	0,35	0,41	0,69
minimi	-0,21	-0,36	-0,38
maksimi	14,04	16,88	101,81
kosteuspitoisuus vähentynyt			

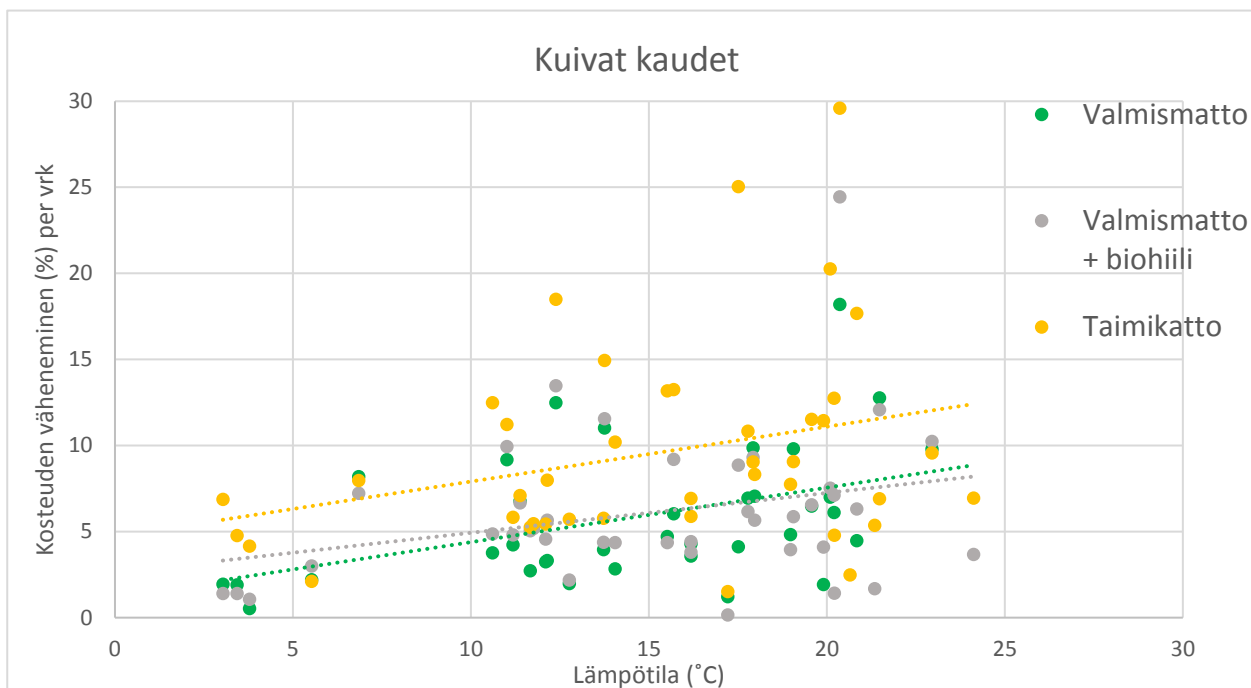


**Kuva 5.** Valikoitujen sadejaksojen aikaiset keskimääräiset kosteuspitoisuudet eri koekatoissa sekä ilman lämpötila ja sadanta.

Kuivista kausista oli kesän 2014 tarkastelujaksolla kylmiä 9, leutoja 22 ja kuumia 10 kappaletta. Leudoilla kuivilla kausilla keskimääräinen kosteushäviö per vuorokausi oli suurempi kuin kylmillä kausilla kaikissa käsittelyissä (Taulukko 4). Kuumilla kuivilla kausilla taimikylvön kosteushäviö nousi entisestään, mutta valmismatto- ja biohiilikattojen kosteushäviö oli hieman alhaisempi kuin leudoilla kausilla. Taimikylvöstä poistui kuivien kausien aikana selvästi enemmän vettä kuin valmismatto- ja biohiilikatoista. Biohiilikatosta poistui keskimäärin enemmän vettä kuin vastaavanlaisesta valmismattokatosta ilman biohiiltä tai sitten biohiili oli sitonut veden itseensä niin, ettei kosteusanhuri havaitse sitä. Kosteutta poistui jonkin verran tehokkaammin ilman lämpötilan kohotessa, mutta korrelaatio ei ole selkeä (Kuva 6). Kosteuden vähentymiseen vaikuttaa lämpötilan lisäksi esimerkiksi kuivan kauden pituus.

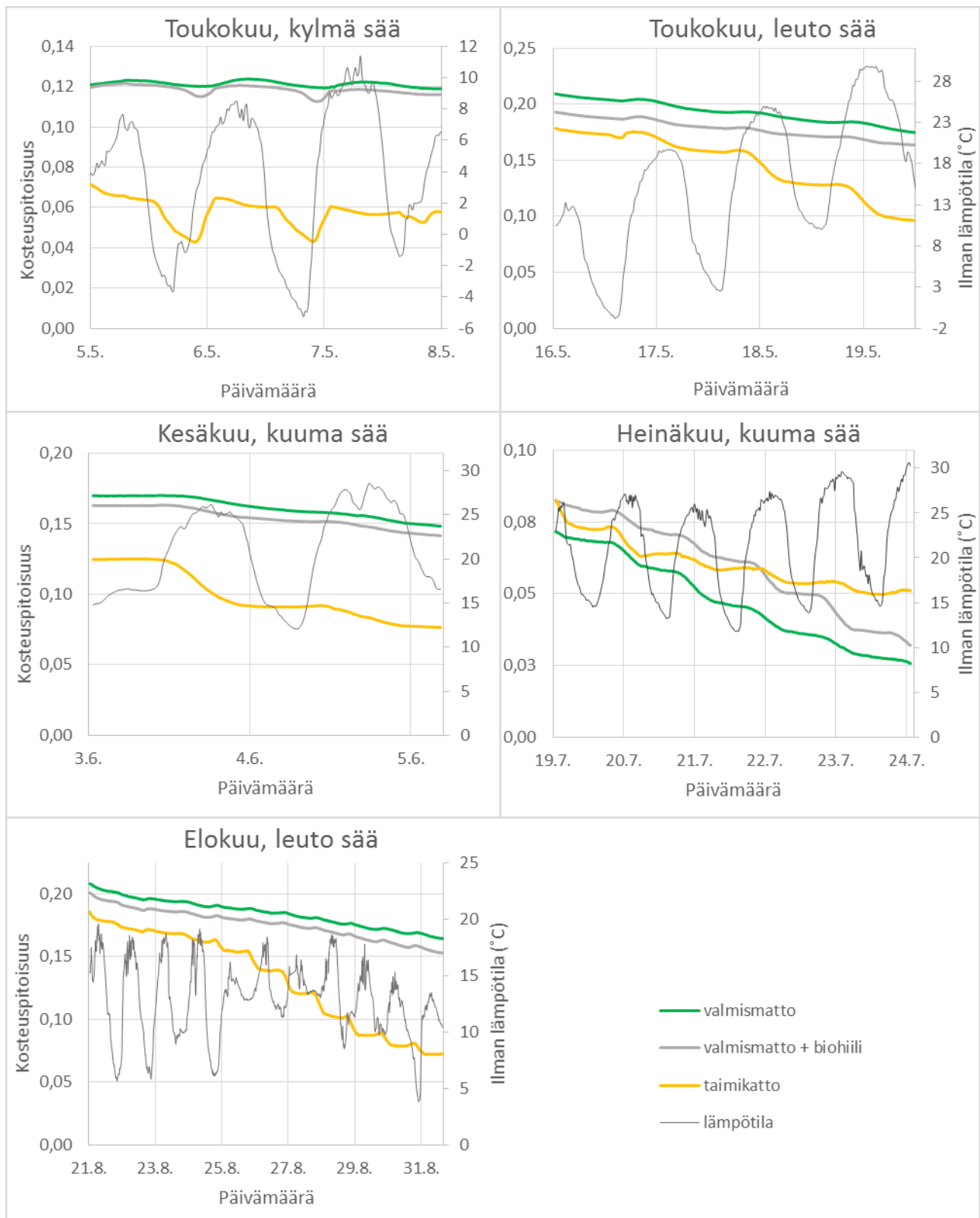
**Taulukko 4.** Kuivien kausien aikainen kosteushäviö (% / vrk) eri koekatoissa ja kuivien kausien keskimääräiset kestot ja lämpötilat

Kuivan kauden lämpötila	Kosteushäviö per vuorokausi			Keskimääräinen	
	Valmismatto	Biohiili	Taimikylvö	kesto (h)	lämpötila (°C)
kylmä	4,3 %	4,5 %	6,9 %	32,3	7,4
leuto	5,4 %	5,9 %	9,7 %	52,9	15,6
kuuma	4,7 %	5,6 %	11,6 %	61,1	21,2



**Kuva 6.** Koekattojen keskimääräisen kosteuspitoisuuden väheneminen kuivan kauden aikana (% alkukosteudesta) suhteessa keskimääräiseen ilman lämpötilaan. Kosteuden väheneminen on laskettu vuorokautta kohden. Kuvasta on poistettu pisteet, joissa kosteuspitoisuus oli kasvanut.

Kuivien kausien aikana ilman lämpötilan vaihtelu heijastuu kattojen kosteuspitoisuuksien vaihteluun (Kuva 7). Taimikylvön kosteuspitoisuus oli selvästi alhaisempi kuin valmismatto- ja biohiilikatoilla, paitsi heinäkuussa kuumalla ilmalla. Tapahtui siis sama ilmiö kuin elokuun kuumalla sadejaksolla (kuva 5), kun kaikki katot olivat hyvin kuivia. Taimikylvön kosteuspitoisuus myös laskee nopeimmin, paitsi heinäkuun kuumalla jaksolla. Kuivien kausien aikana valmismattokattojen kosteuspitoisuudet nousivat muutaman jakson aikana.



**Kuva 7.** Valikoitujen kuivien kausien aikaiset keskimääräiset kosteuspitoisuudet eri koekatoissa sekä ilman lämpötila.



## 4.2. KASVUALUSTOJEN LÄMPÖTILAT

Suurimmat kasvualustan lämpötilat mitattiin biohiilikatossa sekä taimikylvössä joka kuukausi lähimpänä pintaa, kun taas valmismattokatossa suurimmat lämpötilat mitattiin yleensä pohjan etureunasta. Biohiilikaton maksimilämpötilat olivat 0,2-4 astetta korkeampia kuin valmismaton. Taimikylvön maksimilämpötilat olivat puolestaan 0,2-7,4 astetta korkeammat kuin biohiilikaton, riippuen kuukaudesta. Jokaisessa käsittelyssä kuukauden keskilämpötila oli korkein pohjalla laatikon etureunassa, paitsi kesäkuussa valmismattokaton keskilämpötila oli korkein 5 cm:n syvyydessä.

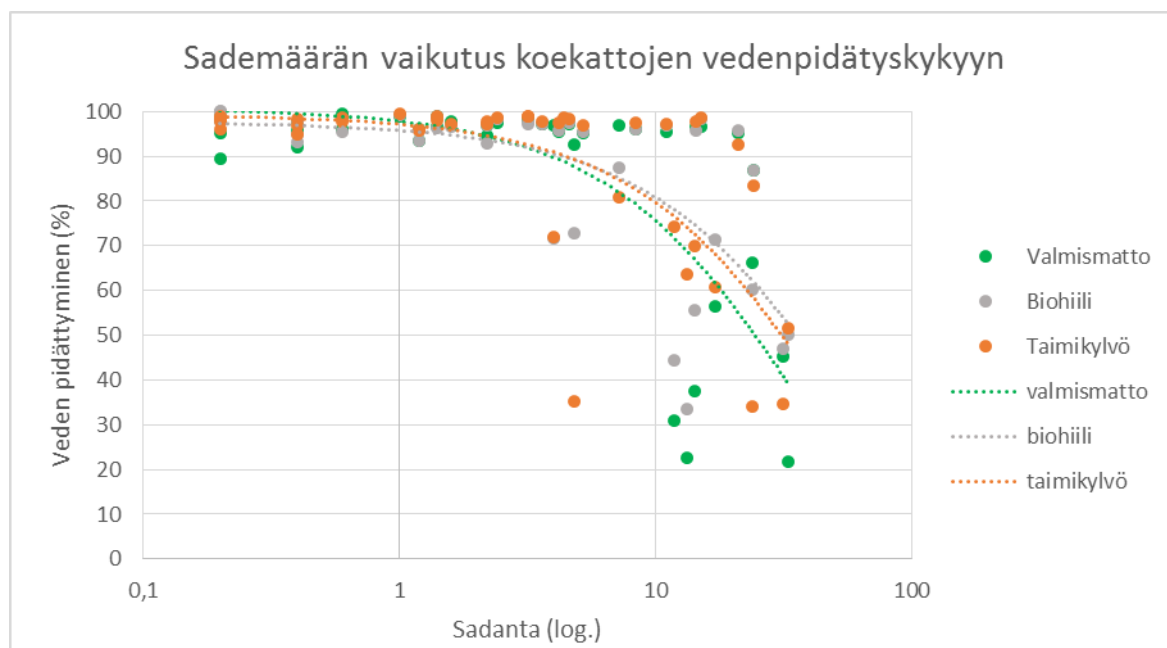
Alimmat lämpötilat mitattiin aina taimikylvön pinnassa. Valmismattokaton keskilämpötila oli myös yleensä alin lähellä pintaa. Biohiilikaton keskilämpötilat olivat hieman alhaisemmat kuin valmismaton. Biohiilikatossa keskimäärin alimmat lämpötilat mitattiin puolestaan alustan pohjalta. Kasvualustoilla ei havaittu suurta lämpögradienttia keskimääräisisten lämpötilojen perusteella. Keskimääräisten lämpötilojen suurin keskihajonta oli 0,38 biohiilikatossa heinäkuussa. Toisaalta heinäkuussa taimikylvön maksimilämpötilan yhteydessä havaittiin lähes 10 asteen lämpötilan vertikaaligradientti, kun lämpötila alustan pinnalla oli jopa 46,8 °C ja pohjalla 37,3 °C.

## 4.3. KASVUALUSTOJEN VEDENPIDÄTYSKYKY

Taimikylvön vedenpidätyskyky oli keskimäärin parempi kuin valmismatto- ja biohiilikattojen (taulukko 5). Kumulatiivinen veden pidätyminen kesän 2014 aikana oli suurin biohiilikatolla ja lähes yhtä suuri taimikylvössä. Valmismattokattojen kumulatiivinen retentio oli 6,5 % matalampi kuin biohiilikaton, mutta kesäkuussa ne kuitenkin pidättivät vettä kaikista käsittelyistä eniten. Vedenpidätyskyky väheni sademäärän kasvaessa ja yksittäisissä sadetapahtumissa biohiili näyttäisi jonkin verran lisäävän vedenpidätyskykyä (Kuva 8). Eri käsittelyjen valuntamäärillä ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitseviä eroja.

**Taulukko 5.** Eri viherkattokäsittelyjen vedenpidätyskyky kuukausittain ja koko tutkimusajanjakson kuluessa kesällä 2014.

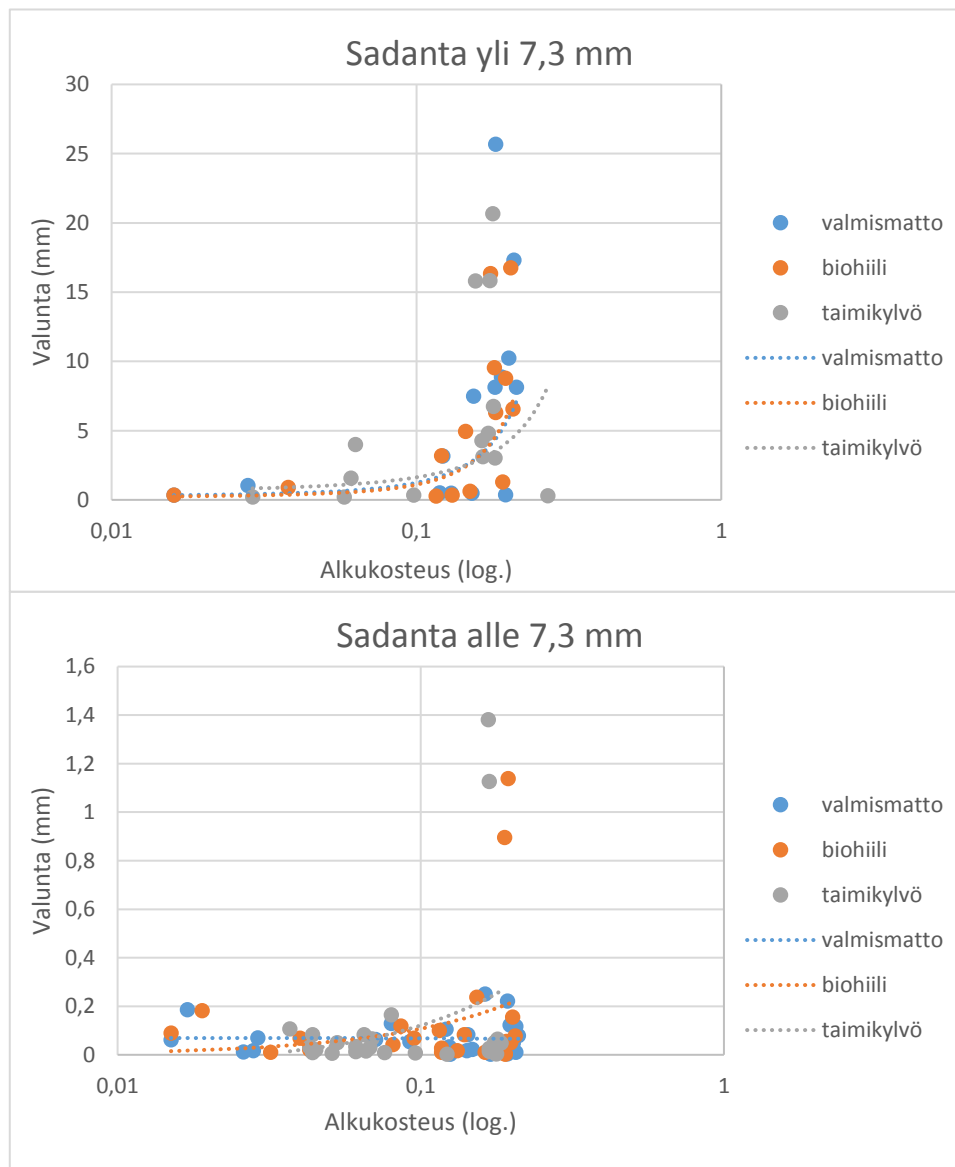
2014	Vedenpidätyskyky (%)		
	Valmismatto	Biohiili	Taimikylvö
toukokuu	61,4	74,4	78,9
kesäkuu	74,8	70,7	59,3
heinäkuu	59,7	66,1	82,5
elokuu	73,1	81,0	81,9
keskiarvo	67,2	73,1	75,7
kumulatiivinen	68,8	73,6	73,5



**Kuva 8.** Koeviherkattojen vedenpidätyskyky (%) suhteessa sadantaan (mm) kesän 2014 aikana

Keskimääräistä suurempien sadetapahtumien (yli 7,3 mm) kohdalla vedenpidätyskyky vaihteli valmismattokatolla 19-97 % välillä, biohiilikatolla 33-98 % välillä ja taimikylvössä 22-99 % välillä. Keskimääräistä pienempien sadetapahtumien kohdalla vedenpidätyskyky puolestaan vaihteli valmismattokatolla 90-99 % välillä, biohiilikatolla 64-99 % välillä ja taimikylvössä 65-100 % välillä.

Kattojen alkukosteuspitoisuuden kasvu lisää niistä valuvan veden määrää jonkin verran (Kuva 9). Keskimääräistä suurempien sateiden (yli 7,3 mm) aikana valmismattokaton valunnan vaihtelusta 38,7 % selittyi alkukosteuden vaihtelulla ja biohiilikaton valunnan vaihtelusta 45,5 %, ja valunnan määrä riippui tilastollisesti merkitsevästi alustan alkukosteudesta. Taimikylvön valunta ei kuitenkaan riippunut alustan alkukosteuspitoisuudesta tilastollisesti merkitsevästi. Keskimääräistä pienempien sadetapahtumien aikana valunnan määrä ei riippunut tilastollisesti merkitsevästi alustan alkukosteudesta minkään käsittelyn kohdalla (Kuva 9).



**Kuva 9.** Koekatoista valuneen suodosveden määrän suhde kasvualustan kosteuspitoisuuteen kunkin sadetapahtuman alussa.

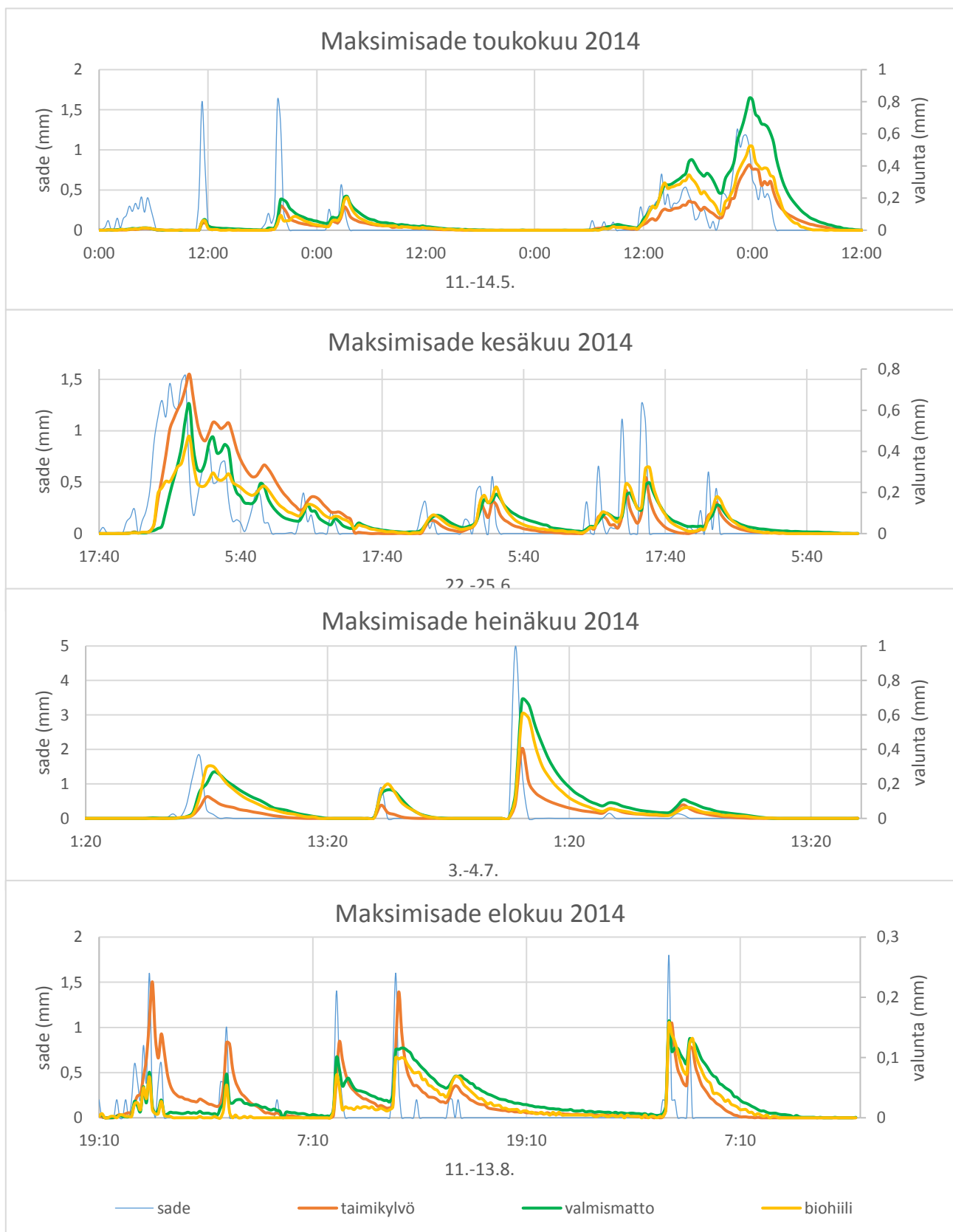
Touko-, heinä- ja elokuun maksimisateiden aikana valmismattokattojen valuntamäärä oli korkein käsittelyistä, mutta kesäkuussa taimikylvöstä tuli eniten valuntaa (taulukko 6). Taimikylvön valuntamäärä oli matalin touko- ja heinäkuun suurissa sadetapahtumissa, ja biohiilikäsittelyn valuntamäärä oli matalin kesä- ja elokuussa. Biohiilikäsittely pidatti siis joka kuukauden suurimmissa sateissa enemmän vettä kuin samanlainen valmismattokatto ilman biohiiltä.

Taimikylvön kosteuspitoisuus oli touko-heinäkuun sadetapahtumien alussa hieman matalampi kuin muiden kattojen (taulukko 6), mutta elokuun sadetapahtumassa taimikylvön alkukosteus olikin 2-3 prosenttiyksikköä korkeampi kuin valmismattokatoissa. Käsittelyjen kosteuspitoisuudet ennen suuria sateita erosivat kuitenkin vain 1-3 prosenttiyksikköä. Sademäärältään suurimmat tapahtumat ulottuivat useamman vuorokauden ajalle. Valunta eri käsittelyistä oli hyvin samantyyppinen ja seurasi hieman jäljessä sadantaa (Kuva 10). Maksimisateiden aikana alkukosteus ei näytä selittävän valunnan viipymää.

**Taulukko 6.** Koekattojen alkukosteuspitoisuus ja valunta sekä valunnan viipymä, sadanta ennen valuntaa ja kokonaissadanta suurimpien sadetapahtumien aikana.

#### Kesän 2014 maksimisateet

	Kosteuspitoisuudet sateen alkaessa			Valunta (mm)		
	Valmismatto	Biohiili	Taimikylvö	Valmismatto	Biohiili	Taimikylvö
toukokuu	18 %	18 %	17 %	25,7	16,3	15,8
kesäkuu	21 %	20 %	18 %	17,3	16,8	20,7
heinäkuu	21 %	21 %	18 %	8,1	6,6	3,0
elokuu	3 %	4 %	6 %	7,5	4,9	6,8
	Viipymä (h)			Sadanta ennen valuntaa (mm)	Kokonaissadanta (mm)	
	Valmismatto	Biohiili	Taimikylvö			
toukokuu	20,33	22,66	22	10,2	31,8	
kesäkuu	6,66	6	5,66	5,9	30,8	
heinäkuu	6,66	6,66	21,33	4,6	11,8	
elokuu	24,33	33,66	7	6–13	17,2	



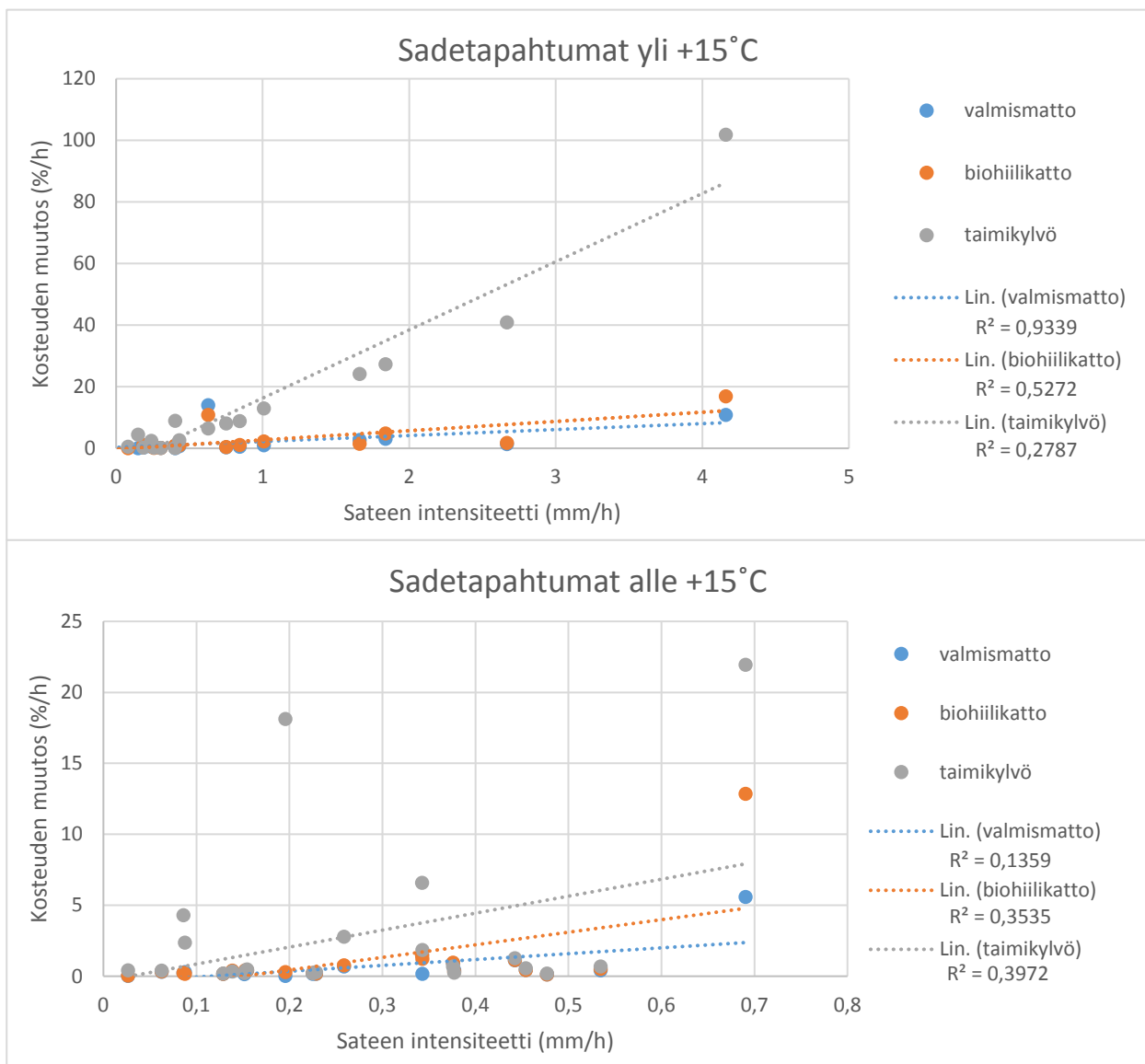
**Kuva 10.** Suurimpien sadetapahtumien aikainen sadanta ja koekattojen valunta kesällä 2014.

#### 4.4. KÄSITTELYJEN EROT VALUNNAN KOKONAISKESTOSSA

Keskimääräistä suurempien sateiden kohdalla taimikylvön valunta kesti keskimäärin 4,2 h kauemmin kuin sade, valmismaton valunta 6,2 h ja biohiilikaton 5,9 h kauemmin. Kruskal-Wallis testin mukaan eri käsittelyjen valuntojen kestoilla ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevää eroa. Keskimääräistä pienempien sateiden kohdalla taimikylvön valunta kesti keskimäärin 12 min vähemmän kuin sade ja valmismattokattojen valunta 2 min vähemmän. Biohiilikaton valunta puolestaan kesti keskimäärin 6 min kauemmin kuin sade. Valuntojen kestoilla ei pienempienkään sateiden kohdalla ollut tilastollisesti merkitseviä eroja käsittelyn välillä. Suurimpien sateiden kohdalla suurin valunnan keston väheneminen (6,5 h) tapahtui taimikylvössä, ja valunta kesti pisimmillään 22,2 h kauemmin kuin sade biohiilikatolla. Pienimpien sateiden kohdalla suurin valunnan keston väheneminen (3,7 h) tapahtui myös taimikylvössä, ja valunta kesti pisimmillään 7,8 h kauemmin kuin sade jälleen biohiilikatolla.

#### 4.5. SATEEN INTENSITEETIN VAIKUTUS KATTOJEN KOSTEUSPITOISUUTEEN

Voimakkaampi sateen intensiteetti nosti taimikylvön kosteuspitoisuutta selvästi enemmän kuin matalan intensiteetin sade (Kuva 11). Regressioanalyysin mukaan sateen intensiteetti selitti kosteuden muutoksesta 28 % valmismattokatolla, 53 % biohiilikatolla ja 93 % taimikylvössä, kun sadetapahtumien keskimääräiset lämpötilat olivat yli 15 °C. Sen sijaan lämpötilan jäädessä alle 15 °C:een sateen intensiteetti selitti kosteuden muutoksesta valmismattokatolla 40 % ja biohiilikatolla 35 %, mutta taimikylvössä kosteuden muutos ei riippunut sateen intensiteetistä tilastollisesti merkitsevästi.



**Kuva 11.** Koekattojen kosteuspitoisuuden lisääntyminen sadetapahtuman aikana suhteessa sateen intensiteettiin. Sadetapahtumien verrattavuuden vuoksi kosteuspitoisuuden muutos sekä sateen intensiteetti on laskettu tuntia kohden.

Tässä yhteydessä sateen intensiteetti oli korkeampi lämpimillä sadejaksoilla (yli 15 °C), koska lämpimällä säällä sadejaksot olivat selvästi lyhempiä kuin kylmällä säällä. Lisäksi kosteuspitoisuuden kasvu on luultavasti voimakkaampaa lämpimällä säällä, koska koekattojen kosteuspitoisuus oli silloin hyvin alhainen sadetapahtuman alkaessa. Kuvasta 11 on selkeyden vuoksi poistettu sadetapahtumat, joissa kosteuspitoisuus laski. Näissä tapauksissa sade on ollut hyvin heikkoa – alle 0,5 mm.

## 5. TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kaikki tutkimamme viherkattokäsittelyt pidättivät vettä hyvin verrattaessa kirjallisuuteen. Vedenpidätyskyvyt vastasivat muualla tutkittujen ekstensiivisten kattojen vedenpidätyskykyjä, jotka vaihtelivat 20–100 % välillä (Ahiablame ym., 2012). Koska koekattojen vedenpidätyskyvyn todettiin vähenevän sademäärän kasvaessa, olisi jatkossakin vastaavissa tutkimuksissa hyvä ottaa sadetapahtumien sademäärä huomioon vedenpidätyskyvyn analysoinnissa ja tulosten tulkinnassa. Keskimääräinen vedenpidätyskyky oli hieman korkeampi taimikylvössä kuin muissa käsittelyissä, ja taimikylvön kosteuspitoisuus laski kuivilla kausilla nopeimmin. Koska keskimääräistä suuremmilla sateilla (yli 7,3 mm) kattojen kosteuspitoisuus vaikutti merkitsevästi niiltä syntyvän valunnan määrään, voidaan todeta, että nopea kosteuden poistuminen on parantanut taimikylvön vedenpidätyskykyä. Taimikylvökatosta tuli kaikki valunta yleensä nopeimmin ulos, joten sille jäi myös enemmän aikaa kuivua ennen seuraavaa sadetta. Taimikylvö kuitenkin pidätti vähiten vettä kesäkuussa, kun sadanta oli huomattavasti korkeampi kuin muina kuukausina. Tällöin valmismattokatot pidättivät vettä parhaiten, mikä saattoi johtua sammalien runsaudesta katoilla. Sammaleet olivat oletettavasti kesäkuussa toimintakykyisempiä kuin heinäkuussa kun oli kuumaa ja kuivaa, jolloin valmismatot pidättivätkin vettä huonoiten.

Tutkimusajanjakson lyhyys ja aitojen toistojen vähäinen määrä saattoivat aiheuttaa sen, ettei käsittelyjen valuntamäärillä todettu tilastollisesti merkitseviä eroja. Etenkin biohiilen vaikutuksia arvioidessa täytyy olla hyvin kriittinen, koska biohiiltä oli vain yhdessä käsittelyssä. Pidempiaikaisissa tutkimuksissa Jokimaalla on myös huomattu, että taimikylvön ja valmismattokattojen välinen ero vedenpidätyskyvyssä on pienin kesällä (Kirsi Kuoppamäki, 2019). Kippimittarien toiminta on ajoittain epävarmaa, sillä ne saattavat mennä hiekanjyvien tai muiden roskien vuoksi tukkoon. Siitä ei kuitenkaan seurannut suurempia ongelmia. Myös kosteus- ja lämpötila-antureiden toiminnassa oli joitakin häiriöitä, joiden tuomaa epävarmuutta voitaisiin vähentää lisäämällä antureita useampiin kattoihin.

Taimikylvön todettiin olevan yleensä kuivin käsittelyistä, mutta sade näkyy hyvin nopeasti pinnan kosteuspitoisuudessa: taimikylvö vettyy sekä kuivuu nopeimmin. Kasvillisuus ei ollut tutkimusjakson aikana vielä kovin kehittänyt taimikylvökatoissa. Valmismaton ja biohiilikaton runsaampi



kasvillisuus puolestaan ehkäisi kasvualustan vettymistä. Heinä- ja elokuussa valmismatto- ja biohiilikatossa kuivat sammaleet luultavasti imivät suurimman osan sadevedestä itseensä, eivätkä alustojen kosteuspitoisuudet juuri nousseet, kun taas vähäkasvisessa taimikylvössä sade kostutti ainakin pinnan hyvin. Kasvillisuuden kehittymistä kasvukauden aikana ei kuitenkaan tarkkaan seurattu, joten tiettyjen kasvilajien vaikutuksesta kattojen toimintaan on vaikea tehdä johtopäätöksiä. Taimikylvön suuret vaihtelut kosteuspitoisuudessa vaikeuttavat kasvillisuuden selviämistä katolla, etenkin juuri perustamisen jälkeen sekä vuodenaikojen vaihtuessa. Biohiilen ansiosta lisääntyvä veden pidäytyminen voi parantaa kasvien hyvinvointia katolla (Beck ym., 2011).

Kun kosteuspitoisuuden lisääntyminen tai väheneminen lasketaan suhteessa alkukosteuspitoisuuteen, valmismatto- ja biohiilikäsittelyissä tapahtuu usein pienempiä muutoksia, koska ne ovat yleisesti kosteampia kuin taimikylvö. Vertailusta olisi voitu saada tarkempi, jos muutokset olisi laskettu millimetreinä vettä. Esimerkiksi Berretta ym. (2014) laskivat kosteushäviön millimetreinä. Erilainen laskutapa hankaloittaa tulosten vertaamista kirjallisuuteen. Kosteuspitoisuuskuvaajista saatiin kuitenkin varmistus laskemille, joissa taimikylvössä todettiin suurimmat kosteuden muutokset. Kosteuspitoisuuden muutokset olivat siis myös määrällisesti suurimmat taimikylvössä.

Veden haihtumisen on todettu olevan nopeinta kuivan kauden alussa, kun kosteuspitoisuus on suurimmillaan (Berretta ym., 2014). Siispä kuivan kauden jäädessä lyhyeksi kosteushäviön laskeminen vuorokautta kohden voi antaa turhan suuria arvoja. Toisaalta kauden ollessa pitkä loppupäivien vähäinen haihdunta voi laskea keskimääräisen haihduntahäviön liian alhaiseksi suhteessa ilman lämpötilaan. Valmismatto- ja biohiilikattojen suhteelliset kosteushäviöt olivatkin kuumilla kuivilla kausilla alhaisemmat kuin leudoilla kausilla, luultavasti johtuen siitä, että kuumat kaudet olivat pisimpiä. Kuumilla kausilla matala alkukosteus myös pienentää haihdunnan mahdollisuutta, ja valmismatto- ja biohiilikatot eivät juurikaan vettyneet kuumalle ilmalle osuneiden sateiden aikana.

Biohiilen on todettu kirjallisuudessa viivyttävän valuntaa (Beck ym., 2011), ja tässäkin tutkimuksessa pisimmät valunnan kestot todettiin biohiilikatosta. Tilastollisia eroja käsittelyjen välillä ei kuitenkaan todettu. Valunnan hitaus on etu, koska se pienentää valuntapiikkejä ja antaa hulevesijärjestelmille enemmän aikaa vesien käsittelyyn (Rowe, 2010). Myös viherkaton haihduttamiseen jää tällöin enemmän aikaa, ja viilentävä vaikutus on suurempi. Taimikylvöstä tuli nopeimmin valunta ulos,

vaikka ne keskimääräistä suurempien sateiden aikana pidättivät eniten vettä, joten valuntanopeuden hypoteesi kumoutui.

Mittausten ajallinen resoluutio (20 min) olisi voinut olla tarkempi etenkin valunnan viipymän ja sateen intensiteetin laskemista varten. Van Woert ym. (2005) totesivat paljaan kasvualustan ja kasvikoekattojen valunnan alkavan 15 minuuttia sateen alkamisen jälkeen, ja sorakatoilta valunta alkoi 5 minuuttia aiemmin. Aineistossani valunta alkoi usein lähes samaan aikaan kuin sade, mutta valuntamäärät olivat alle kippimittarin resoluution, koska ne oli suhteutettu koekaton kokoon. Tekemällä oletus, että valunta alkoi vasta kun valuntasumma oli 1 mm, valunnan viipymälle saatiin ehkä turhan pitkiä aikoja.

Lisäksi Ilmatieteenlaitos erottaa sateet toisistaan, jos niiden välissä on 5 minuutin sateeton jakso, kun taas tässä tutkimuksessa sadetapahtumien välissä piti olla vähintään 6 tunnin kuiva jakso. Tämän vuoksi laskemani sateen intensiteetin arvot eivät ole aina vertailukelpoisia muihin aineistoihin nähden. Usein intensiteetti lasketaankin millimetreinä sadetta per minuutti, kun itse tyydyin laskemaan intensiteetin millimetreinä tunnissa. Sateen intensiteetti selitti kosteuden muutosta vähemmän alle 15 °C lämpötiloissa kuin korkeammissa, koska tällöin intensiteetti jäi korkeimmillaankin alle 0,7 mm/h. Sen sijaan korkeammissa lämpötiloissa sateen intensiteetti kohosi yli 4 mm/h. Näin ollen kosteuden muutoksetkin olivat suurempia. Sateen intensiteetti oli korkeampi lämpimillä (yli 15 °C) ajanjaksoilla, koska sateet olivat silloin lyhempiä.

Taimikylvökatoilla mitattiin käsittelyjen korkeimmat sekä matalimmat lämpötilat. Lähellä pintaa lämpötila vaihteli huomattavasti kasvillisuuden niukkuuden vuoksi. Taimikylvön nopea kosteuden poistuminen ei selity kasvillisuuden haihdutuksella. Vähäisen kasvillisuuden vuoksi kasvualustan pinta pääsee kuivumaan helposti, eikä pohjalle tai kasvualustan keskelle varastoidu vettä. Taimikylvössä mitattiin korkeimmat lämpötilat ja sieltä poistui eniten kosteutta kuivilla kausilla, joten lämpötilahypoteesi toteutui. Valmismattokattojen vähäisempi lämpötilanvaihtelu voi selittyä osittain veden suurella ominaislämpökapasiteetilla – mitä enemmän kosteutta alustassa on sitä enemmän energiaa tarvitaan lämpötilan kohoamiseksi tai laskemiseksi. Kasvien haihdutus ja varjostus viilentävät alustaa, mutta ne myös eristävät kylmältä.

Biohiilikaton maksimilämpötilat mitattiin läheltä alustan pintaa, kuten myös alimmat kosteuspitoisuudet, mutta miksi keskilämpötilan maksimi ja suurimmat kosteuspitoisuudet mitattiin alustan pohjalla etureunassa? Kasvien juuriston on todettu pidättävän vettä (Berretta ym. 2014), pohjalta haihduntaa ei juuri tapahdu ja vettä myös valuu etureunaa kohti pienen kallistuksen vuoksi, mikä selittää suuren kosteuspitoisuuden. Kosteus myös tasaa lämpötilanvaihteluja pohjalla, jolloin alusta ei ehkä pääse yöllä viilenemään yhtä paljon kuin pinnasta, mikä nostaa lämpötilan keskiarvoa. Berretta ym. (2014) totesivat kasvualustojen kosteuspitoisuuden hieman kasvavan pohjaa kohden kasvillisissa viherkatoissa, samoin kuin tutkimillamme valmismatto- ja biohiilikatoilla. He epäilivät sen johtuvan muun muassa pinnan kuivumisen helppoudesta tai kasvualustan ikääntymisestä ja tiivistymisestä, jolloin hienojakoisempaa maa-ainesta kulkeutuu kasvualustan pohjaa kohti. Berretta ym. (2014) eivät kuitenkaan havainneet kasvittomassa koekatossa selvää vertikaalista kosteusgradienttia. Kosteuspitoisuus tutkimassamme taimikylvökatoissa oli myös tasaisempi kuin valmismattokatoissa.

Biohiilen kosteudensitomiskyvyllä saattoi olla vaikutusta siihen, että valmismattokatossa 5 cm:n syvyydessä mitattiin suurimmat kosteuspitoisuudet kun taas biohiilikatossa samalla syvyydellä saatiin pienimpiä pitoisuuksia. Biohiili sijaitisi 5 cm:n syvyydessä eli se oli ehkä imenyt kosteuden, eikä se ollut mitattavissa. Biohiilikaton korkeammat lämpötilat ovat voineet lisätä veden poistumista verrattuna valmismattoon. Biohiili- ja valmismattokäsittelyjen keskimääräiset kosteuspitoisuudet olivat kuitenkin lähes yhtä suuret.

Alhaisin kosteuspitoisuus sadetapahtuman alussa ei välttämättä johda korkeimpaan vedenpidättymiseen. Kesäkuun maksimisateen aikana taimikylvöstä tuli eniten valuntaa, vaikka sen kosteuspitoisuus ennen sadetta oli 2-3 prosenttiyksikköä matalampi kuin muissa katoissa. Elokuun maksimisateella taimikylvön suurempi alkukosteus saattoi nostaa valunnan korkeammaksi kuin biohiilikatolla, mutta se jäi kuitenkin alemmaksi kuin valmismattokatoilla. Alkukosteuspitoisuus ja valunta eivät korreloineet keskenään keskimääräistä pienempien sadetapahtumien aikana, sillä lyhyistä tai heikoista sateista ei välttämättä aiheudu valuntaa, vaikka alustat olisivat hyvin kosteita.

Voin luottavaisin mielin todeta, että Lahdessa tutkittujen viherkattojen perustamistapa soveltuu hulevesien hallintaan etelä-Suomen ilmasto-olosuhteissa. Saamieni tulosten perusteella voisin suositella biohiilen lisäämistä kasvualustaan. Biohiililisäyksen on todettu vedenpidättymisen lisäksi

parantavan maaperän hedelmällisyyttä. Kasvien biomassan tuotanto kasvoi huomattavasti, kun viherkaton kasvualustaan lisättiin 10 m-% biohiiltä (Beck ym., 2011). Tuotannon lisääntyminen voi puolestaan aiheuttaa muita positiivisia vaikutuksia, kuten lisätä haihduntaa. Kasvillisuuden perustamistavalla ei kesäaikaan ollut merkitsevää vaikutusta vedenpidätykseen, joten kasvit voi valita esimerkiksi maisemaan sopiviksi. Samalle alueelle voisi kuitenkin sijoittaa eri tavalla perustettuja viherkattoja, jolloin säävaihtelun vaikutukset voisivat tasoittua. Taimikylvö on halvempi perustaa kuin valmismattokatto, mutta yksittäiset taimet vaurioituvat helpommin kuivuuden tai pakkasen vuoksi, mikä voi aiheuttaa lisäkustannuksia. Kuitenkin vuosien mittaan myös taimikylvökattoihin on kasvanut tiheä kasvillisuus. Energiansäästön ja viherkaton viilentävien vaikutusten maksimoimiseksi valmismattokasvillisuus on taimikylvöä parempi valinta alemman lämpötilan ja vähäisemmän lämpötilan vaihtelun vuoksi.

## 6. VIHHERKATTOJEN TULEVAISUUDENNÄKYMÄ

Viherkattojen rakentaminen on kalliimpaa kuin perinteisten kattojen, mutta viherkaton pitkä elinikä ja energiansäästö voivat tehdä niistä taloudellisemman vaihtoehdon pidemmällä aikavälillä. (Oberndorfer ym., 2007) Viherkaton ansiosta kattopinnan elinikä on 40–50 vuotta kun taas referenssikaton ikä jää 10–30 vuoteen (Nurmi ym., 2014). Jos viherkaton oletetaan kestävä 40 vuotta ja referenssikaton 20 vuotta, viherkaton elinikä on kaksinkertainen verrokkiin nähden, ja siitä saadun hyödyn arvo on 20–25 €/m<sup>2</sup>. (Nurmi ym., 2014) Eliniästä Suomen olosuhteissa ei kuitenkaan ole vielä varmuutta. Jotkin viherkatot Berliinissä ovat kestäneet 90 vuotta ilman suurempia korjauksia (Oberndorfer ym., 2007).

Kustannuksia ja hyötyjä Helsingin kaupunkiolosuhteissa on arvioitu kevyille ja helppohoitaisille viherkattoratkaisuille (Nurmi ym., 2014). Tässä tarkastelussa referenssikaton (laadukas bitumikatto) hinnaksi arvioitiin noin 43 €/m<sup>2</sup> (sisältäen ALV) ja viherkattojen lisäkustannuksiksi 50–60 €/m<sup>2</sup> (sisältäen ALV). Kustannusarvio ei sisällä niitä kustannuksia, joita syntyy, jos kohderakennukseen pitää tehdä rakenteellisia muutoksia, eikä myöskään mahdollisia kasvaneita ylläpitokustannuksia. Kustannusten odotetaan laskevan sitä mukaa kun viherkattoja rakennetaan enemmän. Myös kilpailun lisääntyminen laskee hintoja. Yhden viherkaton asentamisesta tulee lisäkustannuksia 50–60 €/m<sup>2</sup> ja

hyötyjä 30–40 €/m<sup>2</sup> (+20 €/m<sup>2</sup> lentomelualueella), jolloin siitä saatavien yksityisten hyötyjen rahallinen arvo ei kata investoinnin kustannuksia (Nurmi ym., 2014). Laskentaperusteena käytettiin kuitenkin Suomessa markkinoilla yleisimmin tarjolla ollutta ratkaisua eli monikerroksista rakennetta, joka päällystetään esikasvatetuilla maksaruoho-sammalmatoilla. Tällainen monikerroksinen, esikasvatettu ratkaisu on kalliimpi kuin yksinkertaisempi ja kylvämällä perustettava. Helsingin 50 prosentin viherkattoskenaariossa lisäkustannukset olisivat 30–45 €/m<sup>2</sup>, yksityiset hyödyt 30–40 €/m<sup>2</sup> ja julkiset hyödyt vähintään 10 €/m<sup>2</sup>. Lisäksi saataisiin biodiversiteetin kasvua ja esteettistä hyötyä, joille voidaan asettaa tapauskohtaisesti arvoa. Laajassa mittakaavassa hyötyjen arvo ylittää kustannukset, mutta kannustimia yksityisten toimijoiden rohkaisemiseksi saatetaan tarvita. Hyödyt korreloivat positiivisesti sateen määrän ja intensiteetin, lämpötilan ja kaupungistumisen asteen kanssa. (Nurmi ym., 2014)

Kaupunkien keskustoissa hulevedet johdetaan usein sekaviemäriin, jolloin vedenpuhdistuksen kustannukset riippuvat suoraan sadeveden määrästä. Mikäli puolet Helsingin kattopinta-alasta muutettaisiin viherkatoiksi, hulevesien hallinnan helpottumisesta saatu arvo olisi 31–57 miljoonaa euroa ja 10 prosentin viherkattoskenaariossa arvo olisi 5–11 miljoonaa euroa (Nurmi ym., 2014). Keskimääräinen hyöty viherkatosta olisi 1,9–3,4 €/m<sup>2</sup> Helsingin alueella. Nämä julkiset hyödyt jakautuisivat tasaisesti kaikkien asukkaiden kesken. (Nurmi ym., 2014) Erään arvion mukaan Torontossa kuuden prosentin kattopinta-alan käyttäminen viherkattoihin vastaisi huleveden pidätyskyvyltään 60 miljoonan dollarin edestä rakennettua hulevesitunneleita (Aitkenhead-Peterson ja Volder, 2010).

Viherkattoja ei ole Suomessa toistaiseksi kuin muutama kymmenen tuhatta neliometriä (Kotitalolehti 3.6.2015), vaikka niillä on selviä etuja perinteisiin kattoihin nähden. Vuonna 2012 Suomeen rakennettiin uutta viherkattoa 20 000 m<sup>2</sup> (Helsingin uutiset 07.05.2013). Sen sijaan Saksassa niitä rakennetaan vuosittain noin 11 miljoonaa neliötä lisää (Kotitalolehti 3.6.2015). Useissa maissa, kuten Saksa, Sveitsi, Itävalta, Tanska, Yhdysvallat ja Kanada, viherkattojen hyötyjen uskotaan olevan niin suuret, että niiden rakentamiseksi käytetään useita eri ohjauskeinoja vero- ja maksuhelpotuksista rakentamiseen velvoittaviin rakennussäädöksiin (Laurila ym., 2014). Esimerkiksi Sveitsin Baselissa viherkattoja on tuettu taloudellisesti, ja lainsäädäntöön lisättiin vuonna 2002 velvoite, jonka mukaan kaikilla uusilla sekä peruskorjatuilla tasakatoilla tietty vähimmäisosuus tulee olla viherkattoa. Kanadan Torontossa puolestaan jokaisen 30.1.2010 jälkeen rakennetun yli 2000 m<sup>2</sup> rakennuksen

tulee sisältää viherkatto, jonka vähimmäiskoko määritetään tapauskohtaisesti. (Laurila ym., 2014) Myös Saksassa rakennuslaki määrää rakentamaan viherkattoja useissa kaupunkikeskuksissa (Oberndorfer ym., 2007). Vuonna 2002 tehdyn arvion mukaan Saksassa 14 % uusista tasakatoista on viherkattoja. Viherkattojen kokonaispinta-alaa ei tunneta. (Oberndorfer ym., 2007) Ei ole mitenkään mahdotonta, että samankaltaisia käytäntöjä alettaisiin lähitulevaisuudessa soveltaa myös Suomessa.

Helsingin kaupunki on tammikuussa 2016 sitoutunut viherkattolinjauksessaan edistämään viherkattorakentamista ja kehottaa rakennusvirastoa yhteistyössä eri hallintokuntien kanssa laatimaan samanlaiset linjaukset muuallekin. Kaupunki aikoo rakentaa omiin uudisrakennuksiinsa ja peruskorjattaviin kohteisiin viherkatot, kun se on perusteltua linjauksen päämäärien täyttämiseksi. Asemakaavoitukseen suunnitellaan velvoitteita, ja taloudellisen tuen antamisen mahdollisuuksia tutkitaan. Kaupunki perustaa viherkattolinjauksen toteutumista seuraavan viherkattoryhmän sekä käynnistää koerakentamishankkeita ja tekee yhteistyötä tutkijoiden kanssa. Kaupungin työntekijöille järjestetään koulutusta. Lisäksi kylmiin piharakennuksiin tulee tehdä viherkatto rakennusjärjestyksen määräyksen mukaisesti. Viherkattolinjausten lisäksi erilaiset hulevesistrategiat, viheralueohjelmat, kestävä kehityksen strategiat, luonnonsuojeluohjelmat, ilmastonmuutokseen sopeutumiseen tähtäävät strategiat sekä muut koulutukseen, kehitykseen, rakentamiseen, ympäristöön ja luontoon liittyvät strategiat voivat edistää viherkattojen rakentamista. (Helsingin kaupungin viherkattolinjaus, 2016)

Maailmalla on yleistynyt kaupunkien uusien asuinalueiden ympäristökontrollin kiristäminen, joka edistää viherkattojen rakentamista. Suomeen ei ole vielä saatu taloudellisia kannustimia tai voimassa olevaa sääntelyä viherkattoja koskien (Laurila ym., 2014). Ympäristölainsäädäntöä voidaan kuitenkin soveltaa viherkattoihin. Etenkin maankäyttö- ja rakennuslaki ja sen kaavoitusta ja rakentamista koskevat oikeudelliset edellytykset määrittävät edellytyksiä viherkattojen toteuttamiseksi. Luonnonsuojelulain uhanalaisten lajien siirtoa ja vieraslajien leviämisen estämistä, jätelain kierrätysmateriaalien hyödyntämistä sekä ympäristönsuojelulain pilaantumista käsittelevät säädökset voivat rajoittaa viherkattojen toteuttamista tai ohjata sitä haluttuun suuntaan. Viherkattojen oikeudellisen käsitteen määrittelyn puuttuminen voi vaikeuttaa viherkattojen rakentamista ja hidastaa yleistymistä. (Laurila ym., 2014) Hong Kongissa suurimmiksi esteiksi viherkattosysteemien käyttöönotolle todettiin hallituksen ja sosiaalisten yhteisöjen vähäiset edistämistoimenpiteet, kannusteohjelmien puute ja kalliit ylläpitokulut (Ahiablame ym., 2012).

Maankäyttö- ja rakennuslain uudessa luvussa 13 a korostetaan hulevesien hallinnan suunnitelmallisuutta ja luonnonmukaisten menetelmien hyödyntämistä hulevesien pidättämisessä, viivyttämisessä ja imeyttämisessä, mikä vahvistaa viherkattojen asemaa alueiden käytön suunnittelussa (Laurila ym., 2014). Kaupunkikuvallisista vaatimuksista on tyypillisesti määrätty rakennusjärjestyksessä, johon kaupunki tai kunta voi sitten sisällyttää viherkattojen edistämistä tai ohjeistamista koskevia määräyksiä. Niillä ei kuitenkaan voida ohittaa tai tiukentaa yleiskaavan, asemakaavan tai Suomen rakentamismääräyskokoelman vaatimuksia.

Maankäyttö- ja rakennuslain 117.2 § määrittää rakennuksen suunnittelun, rakentamisen sekä muutos- ja korjaustöiden teknisistä vaatimuksista, jotka liittyvät rakenteiden lujuuteen ja vakauteen, paloturvallisuuteen, terveellisyyteen, käyttöturvallisuuteen, esteettömyyteen, meluntorjuntaan ja energiatehokkuuteen. Mikäli rakennuslupaa ei vaadita, voidaan edellyttää toimenpidelupaa: MRL 126 a § ensimmäinen momentti kertoo rakennuksen julkisivun ja katteen tai sen väriytyksen muuttamiseen tarvittavan toimenpidelupaa, mikä tarkoittaisi viherkaton asentamisen vanhaan kiinteistöön vaativan vähintään toimenpidelupaa. Mikäli toimenpidettä pidetään vähäisenä, se voidaan kunnan rakennusjärjestyksessä vapauttaa toimenpideluvan piiristä tai korvata ilmoitusmenettelyllä. Viranomaisvalvontaa viherkattojen rakentamisen laadun tarkkailussa voidaan myös alkaa soveltaa.

## 7. KIITOKSET

Haluan kiittää tutkielman ohjaajaa, Helsingin yliopiston tutkijaa Kirsi Kuoppamäkeä (FT), mielenkiintoisesta tutkimusaiheesta ja avusta tulosten analysoinnissa sekä mukavasta yhteistyöstä aineiston keräämisen parissa. Kiitän myös professori Heikki Setälää selkeistä tilastoanalyysiohjeista.

## 8. KIRJALLISUUS

Aaltonen, Hohti, Jylhä, Karvonen, Kilpeläinen, Koistinen, Kotro, Kuitunen, Ollila, Parvio, Pulkkinen, Silander, Tiuhonen, Tuomenvirta ja Vadsja, 2008: Rankkasateet ja taajamatulvat (RATU), Suomen ympäristö 31, 126 s.

Adler ja Tanner, 2013: Urban Ecosystems – Ecological Principles for the Built Environment, Cambridge, 353 sivua

Ahiablame, Engel ja Chaubey, 2012: Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research, Water, Air, & Soil Pollution (2012) 223, 4253–4273

Aitkenhead-Peterson ja Volder (toim.), 2010: Agronomy monograph 55, Urban ecosystem ecology, USA

Anderson, Lambrinos ja Schroll, 2010: The potential value of mosses for stormwater management in urban environments, Urban Ecosystems 13, 319–332

Beck, Johnson ja Spolek, 2011: Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality, Environmental Pollution 159 (2011), 2111–2118

Berndtsson, 2010: Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review, Ecological Engineering 36, 351–360

Berndtsson, Bengtsson ja Jinno, 2008: Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs, Ecological Engineering 35 (3), 369–380

Berndtsson, Emilsson ja Bengtsson, 2005: The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality, Science of the Total Environment 355 (2006), 48–63

Berretta, Poë ja Stovin, 2014: Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics, Journal of Hydrology 511 (2014), 374–386

Clark, Adriaens ja Lastoskie, 2009: Multimedia modeling of air pollutants in green roof systems, Proceedings of 7th North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities, Atlanta GA, 3–5 June 2009, The Cardinal Group, Toronto

Dietz, 2007: Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions, Water, Air, & Soil Pollution 186, 351–363



Dunnett, Nagase, Booth ja Grime, 2008: Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments, Urban Ecosystems 11 (2008), 385–398

Helsingin kaupungin viherkattolinjaus – Stadin katot elävät, tammikuu 2016

[http://www.hel.fi/static/public/hela/Yleisten\\_toiden\\_lautakunta/Suomi/Esitys/2015/HKR\\_2015-11-24\\_Ytlk\\_37\\_EI/50A2CA25-55BF-433E-8AB9-E036E4B80A4A/Liite.pdf](http://www.hel.fi/static/public/hela/Yleisten_toiden_lautakunta/Suomi/Esitys/2015/HKR_2015-11-24_Ytlk_37_EI/50A2CA25-55BF-433E-8AB9-E036E4B80A4A/Liite.pdf)

Helsingin Uutiset 07.05.2013: Viherkatto menee monelta vielä yli hilseen

<http://www.helsinginuutiset.fi/artikkeli/236242-viherkatto-menee-monelta-viela-yli-hilseen>

Ilmasto-opas.fi: Suomen muuttuva ilmasto, vierailtu 27.3.2016

<http://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/suomen-muuttuva-ilmasto/-/artikkeli/27922915-7ee5-4122-ae60-51f58e6aef9a/sademaarat-kasvavat.html>

Ilmatieteenlaitos: vuositilastot, vierailtu 27.3.2016

<http://ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot>

Ilmatieteenlaitos, 2019: Tilastoja, vierailtu 1.3.2019

<https://ilmatieteenlaitos.fi/tilastoja-vuodesta-1961>

Jylhä, Ruosteenoja, Räisänen, Venäläinen, Tuomenvirta, Ruokolainen, Saku ja Seitola, 2009: Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten, ACCLIM-hankkeen raportti 2009, Ilmatieteen laitos: Raportteja 2009, 4, 102 s.

Kirsi Kuoppamäki, 2019: henkilökohtainen keskustelu

Kotitalolehti, 3.6.2015: Viherkatto helpottaa taloyhtiön vedenhallintaa

<http://www.kotitalolehti.fi/2015/06/viherkatot-tulevat-kaupunkeihin/>

Laurila, Jyrkänkallio-Mikkola, Mesimäki, Kallio, Kuoppamäki, Nieminen ja Lehvävirta, 2014: Normeja viherkatoille – perusteita kehittämiseen

[http://www.helsinki.fi/taydennyskoulutus/hankkeet/julkaisut/Normeja\\_viherkatoille.pdf](http://www.helsinki.fi/taydennyskoulutus/hankkeet/julkaisut/Normeja_viherkatoille.pdf)

Mentens, Raes ja Hermy, 2005: Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?, *Landscape and Urban Planning* 77 (2006), 217–226

Monterusso, Rowe, Rugh, Russell, 2004: Runoff water quantity and quality from green roof systems, *Acta Horticulturae* 639, 369-376

Nurmi, Perrels, Votsis, Lehvävirta, 2013: Viherkatot Helsingissä – kustannushyötyanalyysi, Ilmatieteenlaitos

[http://www.vyl.fi/userData/vyl/koulutus/viherkattoesitys\\_kustannus\\_hyo-ty\\_Nurmi.pdf](http://www.vyl.fi/userData/vyl/koulutus/viherkattoesitys_kustannus_hyo-ty_Nurmi.pdf)

Oberndorfer, Lundholm, Bass, Coffman, Doshi, Dunnett, Gaffin, Köhler, Liu ja Rowe, 2007: Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services, *Bio Science* 57 (10), 823-833

Rowe, 2010: Green roofs as a means of pollution abatement, *Environmental Pollution* 159 (2011), 2100–2110

Sario, Kupiainen, Silvennoinen ja Tervahattu, 2005: Hulevedet ja kiinteistöjen kuivatus – Hallinnon ja lainsäädännön kehittäminen, *Suomen Ympäristö* 776: Rakennetun ympäristön valumavedet ja niiden hallinta, 78-95

Valtanen, Sillanpää ja Setälä, 2012: Lysimetrikoe hulevesien biosuodatukselta kylmässä ilmastossa, Teoksessa Sänkiahho, L. & Sillanpää, N. (toim.), Taajamien hulevesihaasteiden ratkaisut ja liiketoimintamahdollisuudet, Stormwater-hankkeen loppuraportti, 19–24, *Tiede + teknologia* 4/2012

VanWoert, Rowe, Andresen, Rugh, Fernandez ja Xiao, 2005: Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope and media depth, *Journal of Environmental Quality* 34, 1036–1044

YK, 2018: Population <https://population.un.org/wup/Country-Profiles/>

Kuva 2. Kippimittari: <http://www.met.reading.ac.uk/flooding/atmospheric-precursors-to-flash-floods/>